

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra strojírenské technologie

Návrh opravy svařovaných spojů trubek z materiálu
12022.1 po kontaminaci mědi.
Repair Proposal for Weld Joints on Grade 12022.1
Tube after Copper Contamination.

Student: Bc. Robert Maršál

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Robert Maršál**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh opravy svarových spojů trubek z materiálů 12 022.1 po kontaminaci mědi**
Repair Proposal for Weld Joints on Grade 12022.1 Tube after Copper Contamination

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rozbor problematiky svařitelnosti oceli 12 022.1
2. Uveďte možné příčiny kontaminace svarových spojů oceli 12 022.1 při použití v tlakových systémech
3. Proveďte detailní rozbor kontaminovaných povrchů
4. Navrhněte možné způsoby odstranění mědi z povrchu trubek před opravou
5. Navrhněte detailní technologický postup svařování svarových spojů při opravě
6. Bod 5 realizujte a proveďte zhodnocení navržené technologie

Seznam doporučené odborné literatury:

Kolektiv autorů : Materiály a jejich svařitelnost.Ostrava,ZEROSS ,2009
KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.
ČSN EN ISO 15614-1,
ČSN EN ISO 15613
ČSN EN 1011-2

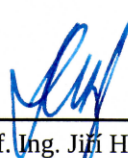
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.4.2012

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- beru na vědomí, že odevzdání své práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

23. 4. 2012



.....
podpis studenta

Bc. Robert Maršál

U Lesa č. 66. Ostrava Hrabůvka 70030.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. MARŠÁL, R. *Návrh opravy svařovaných spojů trubek z materiálu 12022.1 po kontaminaci mědi.*

Diplomová práce Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, 2012, 55 s.

Vedoucí práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Tato diplomová práce se zabývá svařováním varnice po kontaminaci mědi a návrhem technologického postupu svařování. První část obsahuje studii svařitelnosti oceli 12022.1 zabývající se aspekty spojené s kritérii svařování dané uhlíkové oceli. V druhé části diplomové práce jsou vyhodnoceny laboratorní výsledky, s problematikou svařování po kontaminaci potrubí mědí, dále se tato diplomová práce zabývá možným původem vzniku koroze, která zapříčinila poruchu parovodu. Navrhuje technologický postup svařování varnice s ohledem na přítomnost mědi. Tento postup svařování, je aplikován na vzorcích, které se podrobí navrženým nedestruktivním a destruktivním zkouškám. Na základě vyhodnocených výsledků je navržen celkový technologický postup opravy varnice pro dopravu syté páry teplárenského kotle v energetice.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. MARŠÁL, R. *Repair Proposal for Weld Joints on Grade 12022.1 Tube after Copper Contamination.*

Master Thesis Ostrava: VSB – Technical university of Ostrava, Department of Mechanical Technology, 2012.

Thesis head: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

This thesis deals with welding of evaporating tubes after contamination with copper, and suggests the technological process of welding. The first part contains a weld ability study of 12022.1 steel and deal with aspects connected with criteria of carbon steel welding. In the second part, the lab results are evaluated together with problems of pipeline welding after contamination with copper. The work also deals with possible origin of corrosion, which has led to failure of steam pipeline.

It suggests the technological process of evaporating tube welding with respect to copper presence. This welding process is applied to samples which are subjected to the proposed non-destructive and destructive tests. Based on the evaluated results, the overall technological process is proposed for the repair of the evaporating tubes which are used for the transport of saturated steam of heating boiler in power industry.

Obsah

	Strana
Použité značky a symboly	- 8 -
1 Úvod	- 9 -
2 Teoretická část	- 10 -
2.1 Zpracování svařitelnosti oceli 12022.1	- 10 -
2.1.1 Svařitelnost podle ISO	- 10 -
2.1.2 Rozdělení a značení oceli 12 022.1	- 10 -
2.1.3 Normalizační žíhání oceli 12022.1	- 11 -
2.1.4 Chemické prvky oceli 12 022.1 a jejich vlastnosti	- 11 -
2.1.5 Plyny a jejich vliv při absorpci do svarového kovu	- 14 -
2.2 Technologie svařování uhlíkové oceli jakosti 12022.1	- 18 -
2.2.1 Teplota předehřevu	- 18 -
2.2.2 Stanovení teploty předehřevu pro svařování nelegovaných ocelí	- 18 -
2.2.3 Ekvivalent uhlíku	- 19 -
2.2.4 Další možnosti výpočtu teploty předehřevu	- 21 -
2.2.5 Teplo vnesené do svaru.	- 22 -
2.2.6 Kombinovaná tloušťka stěny svařence	- 22 -
2.2.7 Interpass teplota	- 23 -
2.2.8 Transformační diagram ARA oceli 12 022	- 23 -
2.2.9 Možné příčiny kontaminace Cu v systému parovodu.	- 24 -
3 Praktická část	- 25 -
3.1 Charakter, poruch varnic a možné příčiny kontaminace	- 25 -
3.1.1 Technické údaje	- 25 -
3.1.2 Poruchy varnic způsobené kontaminací mědi.	- 26 -
3.1.3 Porucha „A“ - obtížnost svařování a vznik trhlin v oblasti SS.	- 26 -
3.1.4 Rozbor jednotlivých snímků.	- 26 -
3.1.5 Porucha „B“ - perforace steny trubky parovodu v oblasti SS.	- 33 -
3.1.6 Rozbor jednotlivých snímků.	- 33 -
3.1.7 Analýza poruch „A“ a „B“.	- 37 -
3.1.8 Charakter a možné příčiny vzniku poruch.	- 38 -
3.1.9 Alternativní řešení náhrady měděné pasty	- 39 -
3.2 Návrh technologického postupu opravy varnice po kontaminaci Cu.	- 40 -
3.2.1 Návrh odstranění mědi z povrchu trubek před opravou svařováním.	- 40 -
3.2.2 Úprava svarových ploch	- 40 -
3.2.3 Způsob kladení svařovacích vrstev	- 41 -
3.2.4 Vlastnosti základního materiálu	- 42 -

3.2.5	Vlastnosti přídavného materiálu.....	- 42 -
3.2.6	Kvalifikace svářeče.....	- 43 -
3.2.7	Parametry svařování zkušebních vzorků.	- 44 -
3.2.8	Vyhodnocení NDT a DT zkoušek svařovaných vzorků.	- 44 -
3.3	Návrh technologického postup opravy varnic.	- 50 -
4	Závěr	- 51 -
	Použitá literatura	- 54 -
	Seznam příloh	- 56 -

Použité značky a symboly

A	ampér (proud)
Ar	argon
BW	tupý svarový spoj
C	uhlík
C _E /CET	ekvivalent uhlíku
Cu	měď
DT	destruktivní zkoušky
He	hélium
HRC	tvrdost podle Rockwella
H ₂	vodík
HV10	tvrdost podle Vickerse
hm	hmotnostní procento
KCV	vrubová houževnatost podle tvaru vrubu V
KV	vrubová práce
Mn	mangan
Mo	molybden
NDT	nedestruktivní zkoušky
N ₂	dusík
O ₂	kyslík
P	fosfor
ReH	mez skluzu
Rm	mez pevnost
S	síra
Si	křemík
SK	svarový kov
SS	svarové spoj
Ti	titán
TIG	metoda svařování – (obloukové svařování wolframovou netavicí elektrodou v inertním plynu)
TOO / HAZ	tepelně ovlivněná oblast
V	volt (napětí)
pWPS	předběžná kvalifikace postupu svařování
WPQR	protokol o kvalifikaci postupu svařování
WPS	kvalifikovaná specializace postupu svařování

1 Úvod

V této diplomové práci se budu zabývat problematikou opravy trubky svařováním, po kontaminaci mědi. Trubka je částí várnice, která tvoří spalovací komoru teplárenského kotle. Várnice slouží k přenosu tepla mezi spaliny a napájecí vodou a dochází v nich ke změně skupenství. Při běžném provozu je tlak ve várnici 10,5 MPa a maximální teplota vnější stěny várnice je 320°C. Várnice je z oceli jakosti 12022.1, vnější průměr 60,3 mm, tloušťka stěny 5 mm.

V první části se zabývám svařitelností materiálu jakosti 12022.1. V druhé části této diplomové práce se věnuji příčině kontaminace parovodu mědí. Vyhodnotil jsem jednotlivé snímky a výsledky laboratorních protokolů, vyplývající z poškozených částí parovodu. Zpracoval jsem technologický postup svařování trubky. Při použití tohoto postupu svařování jsem nechal svařit původní a novou trubku, tímto způsobem jsem simuloval podmínky opravy parovodu. Navrhl jsem nedestruktivní a destruktivní zkoušky, a na základě výsledků těchto zkoušek jsem navrhl podrobný technologický postup opravy várníc teplárenských kotlů.

2 Teoretická část

2.1 Zpracování svařitelnosti oceli 12022.1

2.1.1 Svařitelnost podle ISO

Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů na konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou. [1]

2.1.2 Rozdělení a značení oceli 12 022.1

Rozdělení oceli třídy 12022 do skupin a podskupin dle TNI CEN ISO – TR 15608 viz tabulka č. 1.

Ocel jakosti 12 022.1 je konstrukční, ušlechtilá, uhlíková, žárovevná se zaručenou minimální hodnotou meze kluzu za vyšších teplot. Vhodná na součásti tepelných energetických zařízení, tlakových nádob a chemických zařízení. Označení číslicí jedna za tečkou, deklaruje tepelné zpracování (**normalizační žihání**).

Tabulka č.1 Rozdělení oceli třídy 12022 dle TNI CEN ISO – TR 15608.

SKUPNA	PODSKUPINA	DRUH OCELI	podle ČSN	OZNAČENÍ PODLE		
1	1.2	Oceli se zaručenou mezí kluzu 275 N/mm^2 $< R_{eH} \leq$ 360 N/mm^2	10084	ČSN 42 002	EN 10027-1	EN 10027-2
				12022	L290NB	1.1142

Tabulka č.2 Značení oceli třídy 12 022 a její alternativy.

Stát	Materiál	Norma
CZ	12022	ČSN 41 2022
DIN	St 45.8	DIN 17175
EU	L290NB	EN 10084-94
US	Gr.A1	ASTM A210

2.1.3 Normalizační žíhání oceli 12022.1

Normalizační žíhání se používá u uhlíkových a nízkolegovaných ocelí. Účelem tohoto tepelného zpracování je vytvořit optimální stav oceli. Jde o tepelné zpracování oceli s překrystalizací. Skládá se z ohřevu 50°C nad teplotu A_{c3} s následujícím vyrovnaním teploty v celém průřezu materiálu a z následného ochlazení na vzduchu, kdy dojde ke strukturálním změnám krystalické mřížky v oceli. Normalizační žíhání má význam docílit jemnozrnné struktury směsi feritu a perlitu podle obsahu uhlíku v oceli. Vytvoří se homogenní struktura, dojde k odstranění vnitřních pnutí a k celkové homogenizaci struktury.

2.1.4 Chemické prvky oceli 12 022.1 a jejich vlastnosti

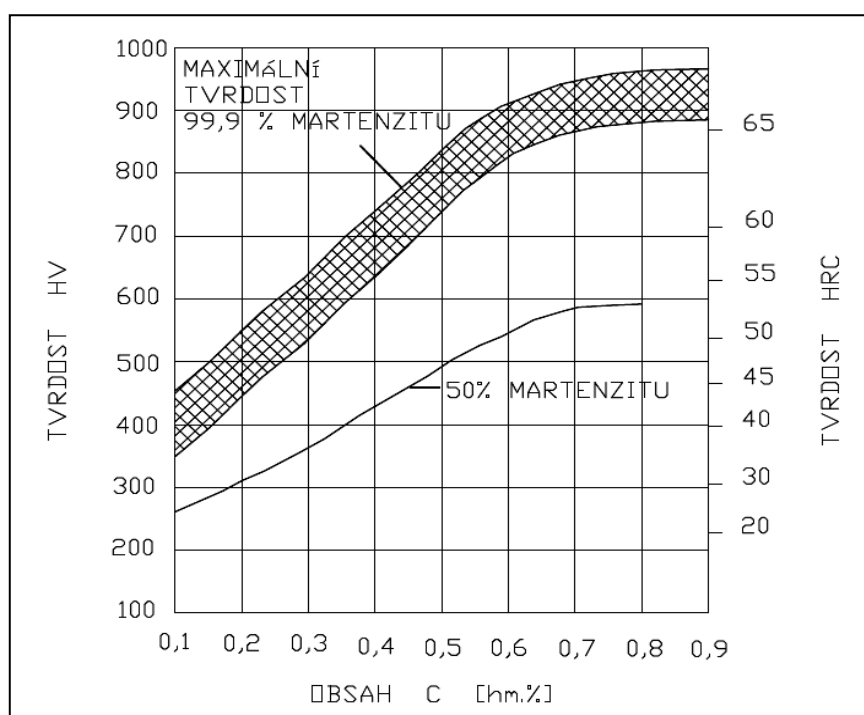
Svařitelnost uhlíkových ocelí je především ovlivňována obsahem C a dalších chemických prvků jako Si, Mn, P a S.

Tabulka č.3 Chemické složení pro oceli 12 022 dle ČSN 412022.

Chem. prvek	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr
Předpis pro ocel 12 022 dle ČSN (rozbor tavby)	0,15 až 0,22	0,50 až 0,80	0,17 až 0,37	max. 0,040	max. 0,040	max. 0,25	max. 0,25	max. 0,25
Dovolené úchyly v hotovém výrobku	±0,02	-0,05 až +0,10	-0,03 až +0,05	---	---	---	---	---
Mechanické vlastnosti: Předpis pro ocel 12 022	Mez kluzu ReH [MPa]				Mez pevnosti Rm [MPa]			
	min. 255				440-570			

Uhlík

Má největší vliv na svařitelnost uhlíkových ocelí, ovlivňuje mechanické vlastnosti ocelí. S rostoucím obsahem uhlíku rostou hodnoty R_m , R_e , HV10, snižují se ale plastické vlastnosti, vyjádřeny hodnotami KCV. Ze zvyšujícím procentem obsahu uhlíku ve SS se zvyšuje množství martenzitu, který vzniká při velkých rychlostech ochlazování. Obsah uhlíku ve svařovaných nelegovaných ocelích je limitován na hodnotu 0,25 hm. %, pro zamezení vzniku studených trhlin ve svarech. U tohoto obsahu uhlíku se dosáhne, za standardní rychlosti ochlazování při obloukové metodě svařování, v TOO svarového spoje 50% martenzitické struktury o tvrdosti 350 HV10. Obr. 2.1. Tato hodnota tvrdosti je stanovena jako maximální přípustná u svarových spojů uhlíkových ocelí. Při svařování oceli s větším obsahem uhlíku než 0,25 hm% je nutné zvažovat tepelné zpracování oceli pro zabránění vzniku studených trhlin.



Obr. 2.1: Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO.

Při dodržení obsahu uhlíku pod hranici 0,25% nemusíme u svarového spoje uhlíkových ocelí s menší tloušťkou aplikovat přehřev.

Norma ČSN EN 1011-2 doporučuje nepřehřívát svarové spoje uhlíkových ocelí s mezí pevnosti do 700 MPa při splnění kritérií, uvedených v tabulce. č. 4.

Tabulka č.4 Přehled tloušťek uhlíkových ekvivalentů podle IIW

Tloušťka svaru s [mm]	Obsah C [%]	$C_{E\ IIW}$
$s \leq 25$	$C \leq 0.22$	$C_{E\ IIW} \leq 0.45$
$s \leq 37$	$C \leq 0.22$	$C_{E\ IIW} \leq 0.41$

Mangan

Zvyšuje R_e a R_m přičemž do určitého obsahu není snížena plasticita. U svařitelných uhlíkových ocelí je díky obsahu Mn možné dosáhnout vyšších hodnot R_e a R_m než odpovídá maximálnímu obsah uhlíku 0.25%. Nelegované uhlíkové oceli mají obsah Mn 0.30 až 1.7 hm. %. Na mangan se váže síra, a tím mangan přispívá k zamezení vzniku lamelárních trhlin způsobenou právě vysokým obsahem síry. Mangan společně s křemíkem mají při výrobě oceli desoxidační účinky, proto se používají při výrobě uklidněných ocelí.

Síra

Síra svým obsahem v nelegovaných ocelích přispívá k zlepšení obrobitelnosti. Ale při procesu svařování způsobuje vznik teplých, likvačních trhlin. Železo a sulfid železnatý tvoří nízkotavitelné eutektikum, které díky oxidu železnatému způsobuje snížení hodnot tavení. Nejzávažnější je oblast tuhnutí a to od teploty tavení železa 1530°C, až po teplotu tavení Fe-FeS eutektika při 988°C. V tomto rozsahu teplot je γ tuhý roztok v rovnováze s tekutou fází, v této oblasti eutektické koncentrace kolem primárních zrn může dojít k obsahu síry až k 31 hm. %. Při technologii svařování tak dochází k natavení eutektika na hranicích zrn a k vzniku teplých, likvačních trhlin. Pro zamezení vzniku těchto trhlin přispívá mangan, ke kterému má síra větší afinitu než k železu. Teplota tavení sulfidu manganu je podstatně vyšší než 1610°C, proto při tuhnutí oceli je tento roztok už v pevném stavu a vytváří krystalizační zárodky, které jsou rovnoměrně v zrnech oceli. Obsah síry je u nelegovaných ocelí limitován hodnotou do 0,05 hm. %.

Fosfor

Jeho přítomnost v nelegovaných, uhlíkových ocelích se omezuje na maximální hodnotu 0,05 hm. %. Při dodržení této hodnoty zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi. Zvyšuje R_e a R_m a snižuje plasticitu oceli. Škodlivé působení fosforu v oceli, má za důsledek vzniku segregačních procesů. Ovlivňuje difuzní rychlost, hlavně v mezidentritických prostorách taveniny tím, že prodlužuje dvoufázovou oblast v rozmezí teplot 1534 až 1050°C. Při malých difusních rychlostech α a γ (ferit, austenit) v tuhém

roztoku, kdy se fosfor nestačí koncentrovat, způsobuje zkřehnutí tuhého roztoku α . Následuje prudký pokles hodnot KCV a vznik studených trhlin.

Nikl

Nikl přidáváme do ocelí a do SK pro zlepšení jejich plastických vlastností zejména při nízkých teplotách a pro zvýšení jejich prokalitelnosti. Nezpevňuje ocel ani substitučně ani intersticiálně.

Chrom

Jde o karbidotvorný prvek, který výrazně precipitačně zpevňuje oceli i svarové kovy. S rostoucím obsahem Cr se také zvyšuje odolnost materiálu proti korozi.

2.1.5 Plyny a jejich vliv při absorpci do svarového kovu

Dusík

Dusík se v železe a jeho slitinách vyskytuje jen v závislosti na výrobě a použité technologii svařování. Dusík, stejně jako uhlík, je austenitotvorný prvek. Vznik nitridů má podstatný vliv na vlastnosti ocelí. Zvyšuje R_e a R_m a HV10, zároveň se snižují plastické vlastnosti jako tažnost a vrubová houževnatost. Při precipitaci nitridů brání nitridy v pohybu dislokací. Vylučování nitridů s ocelí vede k tzv. stárnutí uhlíkových ocelí a křehkosti v oblasti teplot 100 až 350°C.

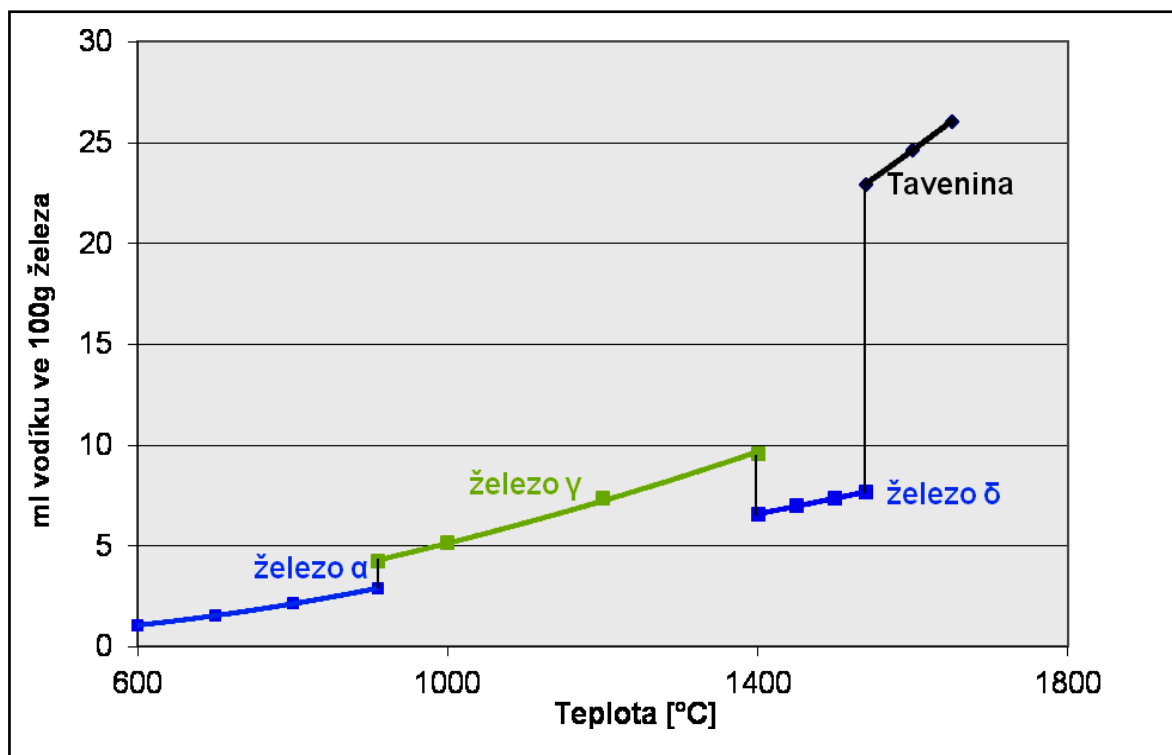
Při nedostatečné ochraně svarové lázně může dusík absorbovat do svarového kovu z okolní atmosféry. Rozpustnost dusíku v železe je závislá na teplotě. Při teplotě 1800°C v rovnovážném stavu může železo absorbovat 0.04% dusíku. Při transformacích $\alpha \rightarrow \gamma$ a $\delta \rightarrow \gamma$ železa, rozpustnost dusíku v železe skokově roste. Při teplotě okolí je rozpustnost dusíku v železe cca 0,001%. Svary provedené v neutrálním kyslíko-acetylenovém plameni obsahují obvykle 0,02% dusíku. Při metodě svařování 111 v bazickém obalu elektrody cca 0.02% dusíku.

Vodík

Vodík je ve slitinách železa nežádoucí příměsí. Jde o intersticiální roztok, kdy vodík H se mění v molekulu vodíku H_2 . Největší rozpustnost v železe γ je vyšší než v železe α a δ . Rozpustnost vodíku železe se podle normy ČSN EN ISO 3690 udává nejčastěji v ml /100g navařeného kovu. Difuze v martenzitické struktuře je mnohem pomalejší než ve feritické nebo perlitické. Vodík je v kovu buď rozpuštěn, nebo tvoří

s kovy hydridy. Chemické prvky **Cr** a **Si** snižují rozpustnost vodíku ve feritu. V železe může být rozpuštěno maximálně 5 ml /100g vodíku, v železe γ maximálně 8 ml /100g vodíku.

Vodík difunduje za větších teplot snadněji do oceli, obr. č. 2.2. V přehřátém SK při teplotě 1800°C až 33 ml /100g. Rozdíl rozpustnosti vodíku ve SK a ve ztuhlém svaru je značný, u tohoto rozdílu vyplývají problémy při svařování feritických ocelí difuzním vodíkem.



Obr. 2.2: Teplotní závislost rozpustnosti vodíku v železe.

Vodík způsobuje ve svarovém kovu vznik pórů, podílí se na oduhličení, na vzniku studených trhlin ve SK a v TOO a také na vzniku vady tzv. „rybí oko“. Tato vada vzniká ve svarech při vysokých obsazích vodíku schopného difuze, při pomalém pozvolném zatěžování svařované konstrukce nad mez pružnosti. Jsou nezjistitelné NDT, dají se detekovat na lomech svarů jako malé, vodíkem indikované trhliny kruhovitého tvaru o rozměrech od 1 do 10 mm. Nejnebezpečnější vadou, kterou vodík způsobuje ve svarových spojích, jsou studené trhliny nazývané „zbrzděné lomy“. U těchto vad je zajímavé to, že k trhlínám může dojít až za několik hodin až dnů po svařování. Příčina těchto trhlín je v objemových změnách při rekombinaci vodíku. V těchto místech dochází k zvýšení tlaku a napětí. [1]

Do svarového kovu se vodík dostává z vlhkosti vzduchu z okolní atmosféry. Nejčastější absorbce vodíku do SK je z vlhkosti přídavného materiálu nebo základního materiálu. Příčinnou vlhkosti ochranných plynů je voda kondenzovaná v tlakových láhvích. Další zdroje vodíku bývají zbytky po povrchových úpravách, maziva, barvy a čisticí roztoky (moření).

Vodík může být obsažen ve SK ve dvou formách:

- V molekulárním stavu (H_2) jako plynové vměstky na hranicích zrn, nebo v poruchách mřížky (často pod vysokým tlakem),
- Jako vodíkový iont H^+ (proton) intersticiálně rozpuštěný v mřížce železa.

Vodíkový iont H^+ se vyznačuje snadnou difuzí mřížkou železa, dokonce za normální teploty.

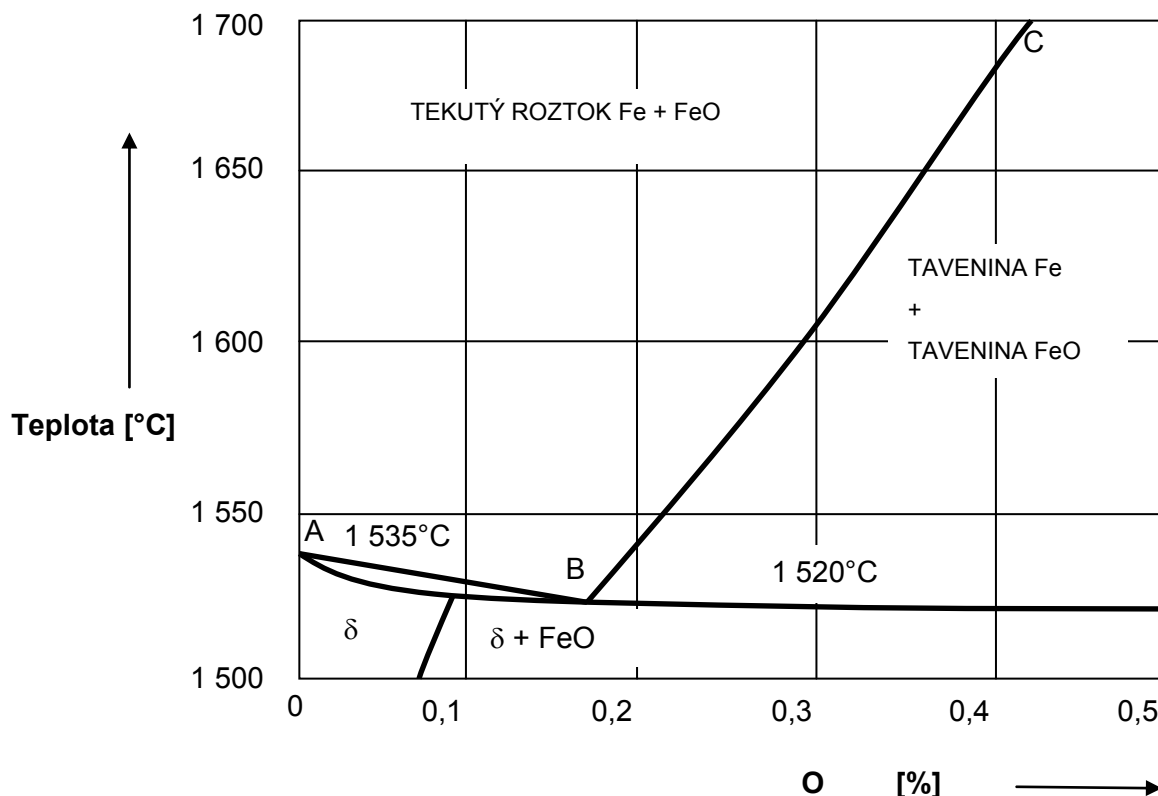
Zamezit vzniku vad způsobených vodíkem můžeme zabránit následujícím opatřeními, která obvykle navzájem kombinujeme:

- Předehřevem svarových spojů,
- Aplikovat dohřev SS,
- Používat vysušené přídavné materiály,
- Přídavné materiály s deklarovaným sníženým obsahem vodíku,
- Větší tepelný příkon při svařování, použitím větších průměrů přídavných materiálů.

[2]

Kyslík

Kyslík se v oceli rozpouští ve formě FeO (oxid železnatý). V tuhém stavu se kyslík v železe rozpouští jen nepatrně. Ve stavu tekutém je jeho rozpustnost značná. Při teplotě 1520°C je cca 0,18%, bod „B“ viz obr. č. 2.3.



Obr. 2.3: Rovnovážný diagram Fe-FeO v oblasti teplot tavení.

Při svařování je rozpustnost kyslíku v železe dána především použitou technologií svařování. Při svařování elektrickým obloukem je obsah kyslíku ovlivňován především druhem a tloušťkou obalu, intenzitou použitého proudu a délkou oblouku. U kyselých a rutilových obalů kolísá obsah kyslíku ve svarovém kovu mezi 0,05 až 0,1%. U zásaditých obalů je obsah kyslíku ve svarovém kovu nižší než 0,05%.

Kyslík působí na mechanické vlastnosti podle toho, je-li v oceli rozpuštěn nebo je-li obsažen v oceli ve formě vměstků. V rozpuštěném stavu působí kyslík na mechanické vlastnosti bezprostředně. S rostoucím obsahem kyslíku klesá pevnost a tvrdost svarového kovu. Tažnost se mění velmi málo. Vrubová houževnatost silně klesá. Je-li kyslík obsažen ve svarovém kovu ve formě vměstků (oxidů), snižuje soudružnost svarového spoje.

Obsah kyslíku ve svarovém kovu můžeme snížit tím, že do svarového kovu dolegujeme prvky s velkou afinitou ke kyslíku. Desoxidační prvky jsou především Si, Mn, Al a Ti.

[1]

2.2 Technologie svařování uhlíkové oceli jakosti 12022.1

2.2.1 Teplota předehřevu

Sklon k zakalení TOO svarového spoje nejlépe vyjadřuje C_E , který ovlivňuje zejména náchylnost svarových spojů ke vzniku studených trhlin. Jejich vznik je kromě chemického složení materiálu ovlivněn také obsahem difusního vodíku ve svaru, tloušťkou svarových dílů a množstvím tepla vneseného do svarového spoje při svařování na jednotku jeho délky. Jedním ze základních technologických opatření, kterým snižujeme riziko vzniku studených trhlin ve svarových spojkách, je předehřev základních materiálů.

Předehřev svarových spojů:

- snižuje rychlost ochlazování svaru a tím zabraňuje zakalení TOO svarového spoje,
- umožňuje vznik příznivějších struktur z hlediska difuze vodíku,
- prodlužuje čas, po který může vodík difundovat ze SS,
- snižuje teplotní gradient ve svaru a tím přispívá ke snížení zbytkových napětí vyvolaných svařováním.

2.2.2 Stanovení teploty předehřevu pro svařování nelegovaných ocelí

Teplotu předehřevu „ T_p “ lze vypočítat jako součet příspěvků jednotlivých parametrů: **dle ČSN EN 1011 – 2 metoda B.** [5]

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Tato rovnice platí pro konstrukční oceli s R_m do 1000 MPa a pro:

CET = 0,2 až 0,5 %

d = 10 až 90 mm

HD = 1 až 20 ml • 100g⁻¹

Q = 0,5 až 4,0 kJ • mm⁻¹

Výpočet jednotlivých parametrů:

- vliv chemického složení oceli, vyjádřené uhlíkovým ekvivalentem

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad [^{\circ}C],$$

- vliv tloušťky svařovaných materiálů d [mm]

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad [^{\circ}C],$$

- vliv obsahu difusního uhlíku HD ve SK v $[ml \cdot 100g^{-1}]$
stanoveného podle ČSN EN ISO 3690

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad [^{\circ}C],$$

- vliv tepelného příkonu Q $[kJ \cdot mm^{-1}]$

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 CET + 32 \quad [^{\circ}C]$$

Po dosazení a úpravě, můžeme vest výpočet tímto způsobem

$$T_p = 697 \cdot CET + \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \quad [^{\circ}C]$$

2.2.3 Ekvivalent uhlíku

Vliv chemického složení oceli na její svařitelnost vyjadřujeme nejčastěji tzv. ekvivalentem uhlíku C_E , který vyjadřuje příspěvek legujících prvků ke kalitelnosti oceli. Struktury martenzitu a spodního bainitu v TOO svarového spoje a ve svarovém kovu i při nižších rychlostech ochlazování způsobují obtížnosti při technologii svařování oceli. Proto je ekvivalent uhlíku zároveň ukazatelem svařitelnosti oceli z pohledu jejího chemického složení. Ve všech vzorcích pro výpočet ekvivalentu uhlíku má dominantní úlohu obsah uhlíku v oceli. Do některých vztahů je pro výpočet C_E zahrnuta i tloušťka svařovaného materiálu. Čím je tedy hodnota C_E materiálu větší, tím hůře se daný materiál svařuje. [1]

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu feritických ocelí doporučuje norma ČSN EN 1011-2 rovnici pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli podle IIW :

$$C_{E(IIW)} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} = [\%] \quad [5]$$

pokud jsou splněny podmínky chemického složení ocelí definovaného pro výpočet ekvivalentního uhlíku C_E . Teplota předehřevu T_p se odečítá z grafů uvedených v normě ČSN EN 1011-2, které vyjadřují vliv obsahu difuzního vodíku, kombinované tloušťky SS, hodnoty ekvivalentního uhlíku a tepelného příkonu na minimální požadovanou teplotu předehřevu pro eliminaci vodíkového praskání (vznik studených trhlin). Pokud mají být spojovány oceli s rozdílnými uhlíkovými ekvivalenty nebo rozdílných jakostí, má být použita vyšší hodnota uhlíkového ekvivalentu. Nejčastějším opatřením eliminace vodíkového praskání je snížení absorpce vodíku do svarového kovu z přídatných svařovacích materiálů.

Mezní hodnoty, které je možné svařovat bez předehřevu v závislosti na ekvivalentu CE jsou uvedeny v tabulce č. 4. a 5. [1]

Tabulka č.5 Maximální kombinované tloušťky bez předehřevu

Obsah vodíku (ml/100g svar. kovu)	Maximální kombinovaná tloušťka (mm)			
	CE = 0,49		CE = 0,43	
	Tepelný příkon		Tepelný příkon	
	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm
> 15	25	50	40	80
$10 \leq 15$	30	55	50	90
$5 \leq 10$	35	65	60	100
$3 \leq 5$	50	100	100	100
≤ 3	60	100	100	100
Při obsahu vodíku měřeno podle ISO 3690.				

Všeobecný návod pro výběr vhodného stupně obsahu vodíku pro různé metody svařování viz tabulka č. 6.

Tabulka č.6 Stupně obsahu vodíku

Obsah difusního vodíku (ml/100 g svarového kovu)		Stupně obsahu vodíku
>	15	A
10	≤ 15	B
5	≤ 10	C
3	≤ 5	D
	≤ 3	E

U svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře (TIG) lze použít stupeň D.

2.2.4 Další možnosti výpočtu teploty přehřevu

Jsou to výpočty určené pro specifické skupiny ocelí, podle jednotlivých autorů například výpočty podle a) Serefiana, a b) Ita a Bessya.

a) Dle Serefiana:

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360}$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c$$

$$C_p = C_c + C_s$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p} - 0,25 \quad [^{\circ}C],$$

b) Dle Ita a Bessya:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$K = k_0 \cdot s \quad [MPa]$$

$$P_w = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4}$$

$$T_p = 1440 \cdot P_w - 392 \quad [C^{\circ}]$$

[6]

2.2.5 Teplo vnesené do svaru.

Tepelný příkon je při svařování důležitým faktorem. Může mít zásadní vliv na vlastnosti svaru. V průběhu svařování ovlivňuje teplotně časové cykly.

Hodnota tepelného příkonu lze vypočítat dle ČSN EN 1011-1

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}].$$

Kde: $Q \rightarrow$ Množství tepla přivedeného do SS na jednotku jeho délky [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$],
 $k \rightarrow$ koeficient tepelné účinnosti metody svařování,
 $U \rightarrow$ napětí při svařování [V],
 $I \rightarrow$ intenzita svařovacího proudu [A],
 $v \rightarrow$ rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$].

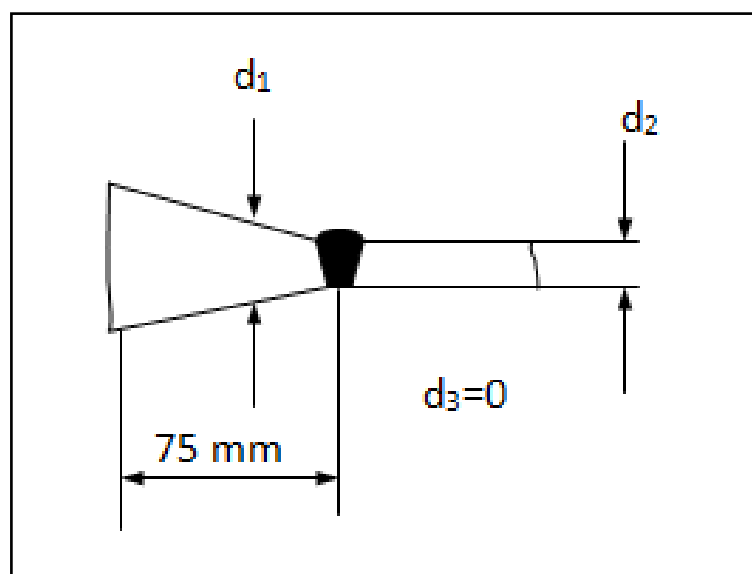
[4]

2.2.6 Kombinovaná tloušťka stěny svařence

Kombinovaná tloušťka se používá k hodnocení odvodu tepla ze spoje pro účely stanovení rychlosti ochlazování.

Kombinovaná tloušťka plochého BW svarového spoje se vypočítá jako součet tlouštěk základních materiálů ve spoji do vzdálenosti 75 mm od hrany svarového spoje.

Kombinovaná tloušťka = $d_1 + d_2 + d_3$



Obr. 2.4: Stanovení kombinované tloušťky stěny BW svarového spoje.

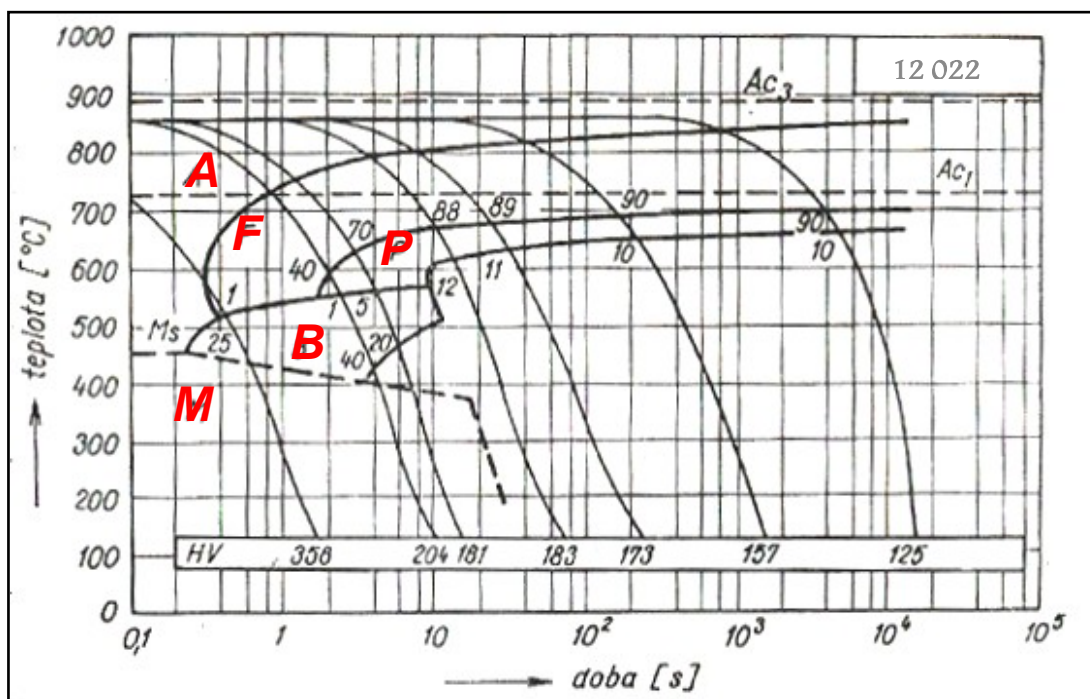
2.2.7 Interpass teplota

Jde o mezi-housenkovou teplotu SS aplikovanou především u vícevrstvého svařování. Při svařování uhlíkových feritických ocelí větších tloušťek je běžně předepisována interpass teplota stejná jako teplota předehřevu. Překročení interpass teploty může nepříznivě ovlivnit mechanické vlastnosti. S vysokou teplotou interpass hrozí u uhlíkových feritických ocelí pokles meze kluzu i meze pevnosti.

2.2.8 Transformační diagram ARA oceli 12 022

Transformační diagram pro ocel jakosti 12 022 znázorňuje průběh plynulého ochlazování austenitu a udává vliv teploty a času na průběh přeměny struktury v oblasti svaru. Na rozdíl od rovnovážných diagramů platí pro ocel určitého chemického složení a pro určité podmínky austenizace. Obsahují údaje o perlitické, bainitické a martenzitické přeměně austenitu.

Na obrázku č. 2.5 jsou znázorněny jak přeměny struktury SS, ale i v závislosti na průběhu ochlazovací rychlosti, záznam výsledné tvrdosti (HV).



Obr. 2.5: ARA diagram oceli jakosti 12 022. [10]

2.2.9 Možné příčiny kontaminace Cu v systému parovodu.

Měď

Teplota tání mědi je 1084°C. Měď se v energetice používá, díky sníženým vlastnostem korozních účinků a vysokou tepelnou vodivostí. Vzhledem k těmto vlastnostem se Cu používá v podobě tenkostěnných trubek v kondenzátorech, výměnících tepla a ohříváků. Díky svým plastickým vlastnostem se také měď používá jako těsnící materiál vysokotlakých armatur. Měď je také aplikována v podobě mazacího extraktu, které jsou právě na bázi měděných zrn. Tyto pasty se používají k mazání horkovodních, parních systémů armatur, jejich dělicích ploch a přírub.

Z výše uvedených potenciálních směrů kontaminace mědi jsem eliminoval nejpravděpodobnější příčinu kontaminace Cu.

- Původní měděné trubky kondenzátorů byly již v minulosti nahrazeny mosaznými trubky nebo materiálem z nerezavějících ocelí. Taktéž i trubky výměníků tepla, ohříváků.
- Měď po vyžhání, dosahuje dobré, plastické vlastnosti a díky této vlastnosti je aplikována jako těsnící materiál do vysokotlakých a vysokoteplotních systémů. Používá se jak do dělicích rovin armatur, tak jako mezi přírubové těsnění potrubních systémů a armatur. U těchto řešení je těsnící materiál z Cu v přímém kontaktu s daným médiem. Tudíž je možná kontaminace.
- Z hlediska přímého, volného styku s vnitřní částí potrubního celku je nejsnadnější a nejpravděpodobnější kontaminace použitím mazacích past na bázi měděného prášku v anorganickém pojidle. Toto mazivo se používá pro mazání vnitřních součástí armatur, přírubových spojů a dělicích rovin armatur. Aplikovaná pasta je při montáži potrubních součástí vtlačena do vnitřních prostorů potrubí a dochází tak k přímé kontaminaci.

3 Praktická část

3.1 Charakter, poruch varnic a možné příčiny kontaminace

V této části diplomové práce se věnuji problematice svařování trubky kontaminovanou mědi, spalovací komory teplárenského kotle. Trubka je součástí systému výparníku v energetice.

Zabývám se rozbořem a vyhodnocením laboratorních výsledků i snímků z daných problematických částí parovodu. Navrhuji celkové řešení opravy na základě provedených laboratorních výsledků zkoušek svařeného potrubí ze vzorku nové trubky a trubky z inkriminovaného parovodu. Sestavil jsem návrh technologického postupu svařování pro celkovou opravu varnice.

3.1.1 Technické údaje

- Lokalizace – vnitřní stěny parní komory ve výšce cca 7,5m v oblasti hořáků, kde je v kotli nejvyšší teplota cca 1200°C.
- Jakost oceli 12 022.1.
- Trubka $\varnothing = 60,3 \times 5$ [mm].
- Tlak vody $10 \div 15$ [MPa].
- Sdílením tepla mezi spaliny, ocelí a médiem (vodou) se v daném místě teplota stěny potrubí pohybuje obvykle v rozmezí 320 až 380°C.
- Voda v daném místě potrubí přechází do skupenství páry (syté páry, nasycené páry). Jde o médium, které je v termodynamické rovnováze s kapalinou o stejné teplotě a tlaku. Jedná se o dynamickou rovnováhu, při které je vypařená látka, přesně nahrazena zkondenzovanou, počet molekul opouštějících hladinu je roven počtu molekul, které se do kapaliny po zkapalnění vrací.

3.1.2 Poruchy varnic způsobené kontaminací mědi.

Dle charakteru poškození potrubí jsem rozdělil poruchy na dvě části **A**, a **B**. Tyto poruchy mají v oblasti poškození společný výskyt Cu. Popisují a vyhodnocují jednotlivé poruchy.

3.1.3 Porucha „A“ - obtížnost svařování a vznik trhlin v oblasti SS.

Při opravě příčné trhliny trubky varnice, kdy svářeč dle běžného technologického postupu, svařoval poškozenou část, došlo k značné obtížnosti svařování. Samotný proces svařování měl průvodní známky pěnivosti a špatnou tvorbu kresby svarové housenky viz obr. č. 3.1. Po následující zkoušce prozářením, byly zjištěny trhliny kolem svaru. Následovalo vyjmutí části poškozené varnice a dodána jako vzorek pro laboratorní analýzu.

Vzorek varnice byl podroben rozborům nánosů na vnitřních stěnách trubky, dále metalografický rozbor a analýza příčiny praskání svarových spojů.

Dodané vzorky trubky byly mechanicky rozděleny na menší části pro detailnější šetření povrchu a dále na příčné řezy pro detekci trhlin. Pomocí mikroskopu a spektrometru byla zkoumána struktura a charakter povrchu vzorku. Povrch byl leptán 4% HNO₃.

3.1.4 Rozbor jednotlivých snímků.

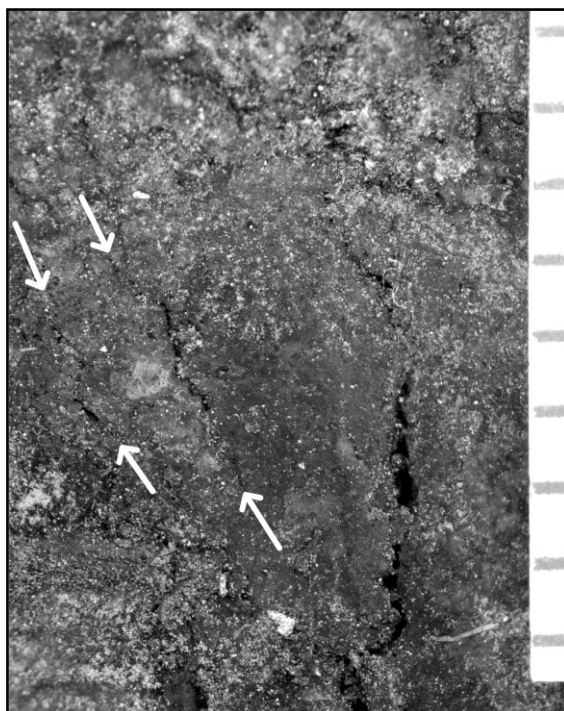
Na snímcích jsou patrné v okolí svaru trhliny, které se vyskytly převážně v oblasti TOO svarového spoje, viz obr. č. 3.1 až 3.3.



Obr. 3.1: vnitřní povrch trubky se svarem a trhlinami v jeho blízkosti. zvětšeno 2x

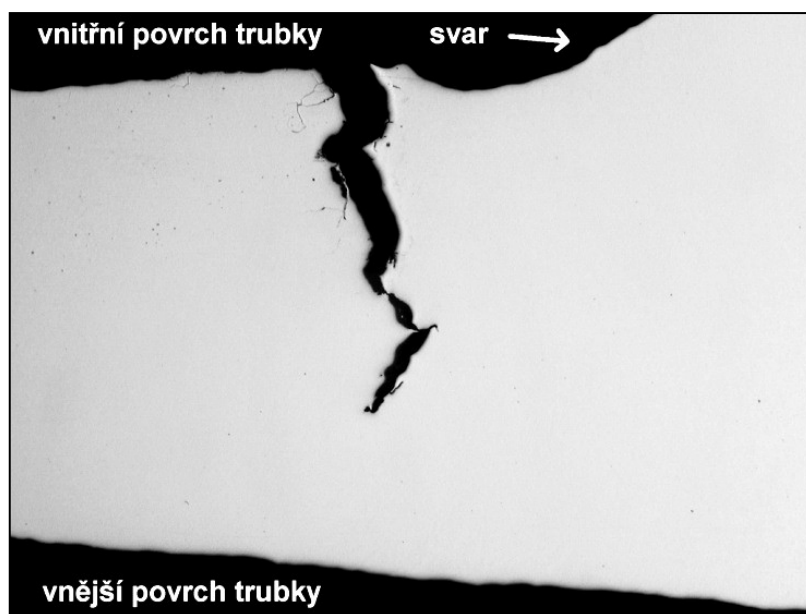


Obr. 3.2: Detail trhliny k obr. č. 2. zvětšeno 4x.



Obr. 3.3: Snímek menších trhlin u svaru z jedné strany, zvětšeno 10x

Charakteristickým znakem těchto trhlin je jejich poloha a směr. Tyto trhliny se projevily na místech podél SS a to v TOO. Na snímcích vzorku v příčném řezu jsou patrné trhliny směřující z vnitřní strany stěny trubky, viz obr. č. 3.4 a č. 3.5.

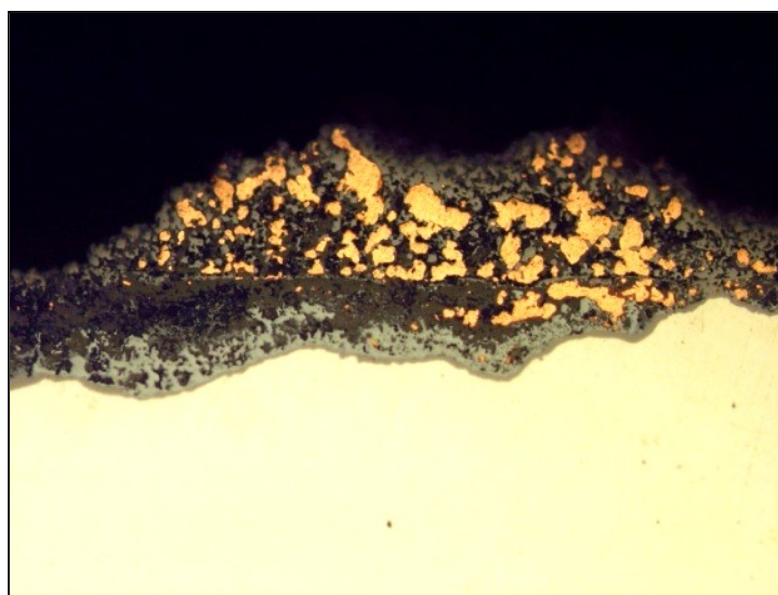


Obr. 3.4: Snímek vzhledu trhliny u svaru, zvětšeno 14x.

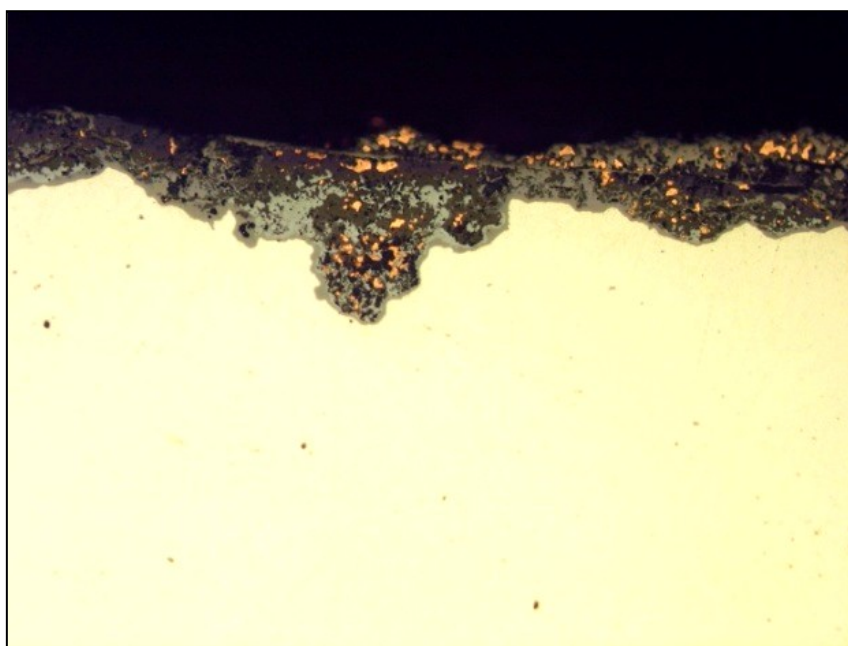


Obr. 3.5: Detail trhliny zvětšeno 72x.

Při šetření vnitřního nánosu trubky je pozorován výskyt červených útvarů mědi. Cu se vyskytuje také v oblasti trhlín, kde bylo zjištěno větší množství. Snímky č. 3.6 a č. 3.7.



Obr. 3.6: Cu, světle červené útvary, zvětšeno 144x.

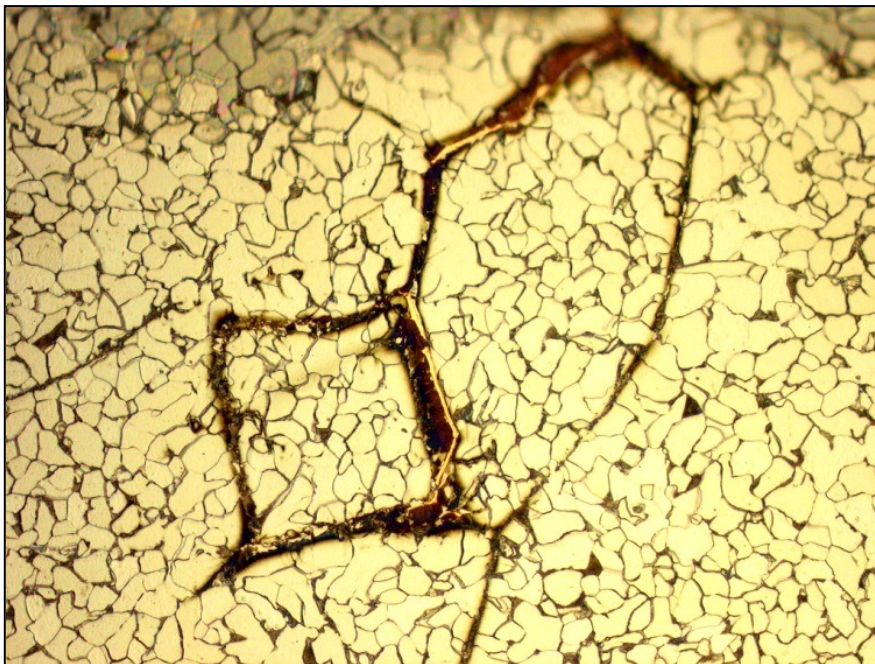


Obr. 3.7: Cu blíže k povrchu trubky, zvětšeno 144x.

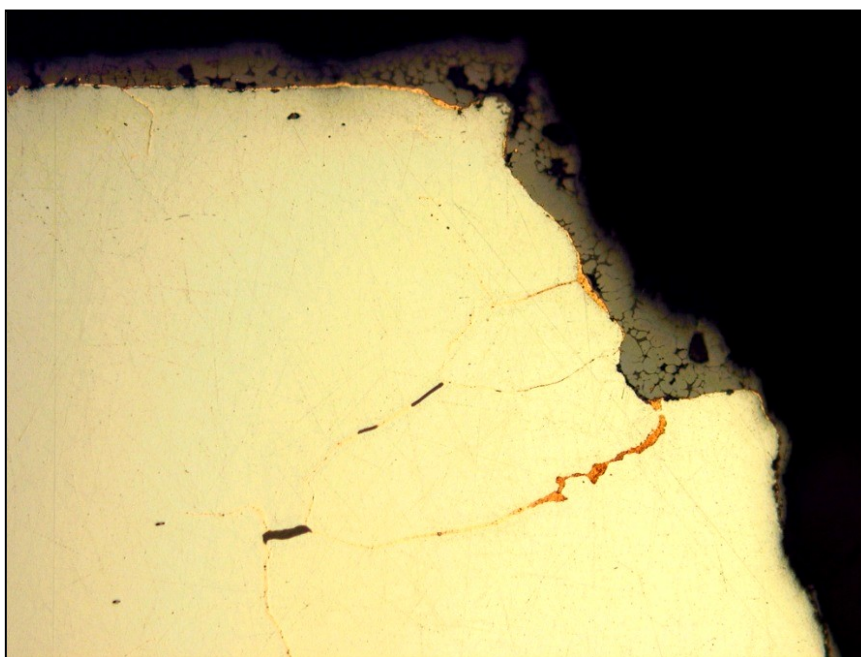
Měď je přítomna přímo ve vnitřních prostorech trhlin, ve větších i v menších trhlinách, viz obrázky č. 3.8 a č. 3.10.



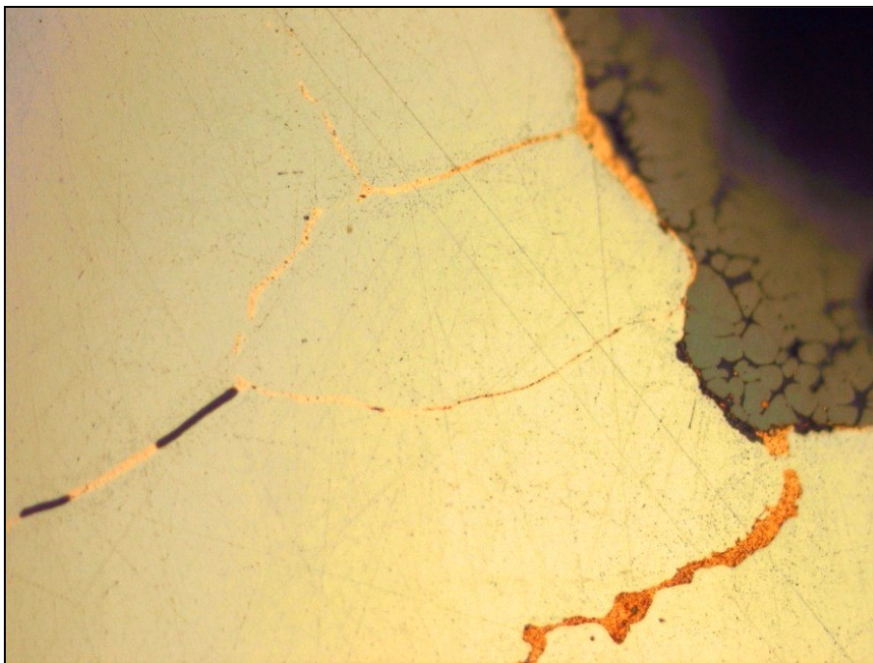
Obr. 3.8: Vzhled dalších (menších) trhlin u svaru, zvětšeno 144x.



Obr. 3.9: Detail obr. 3.8 Cu v trhlinách, zvětšeno 360x.



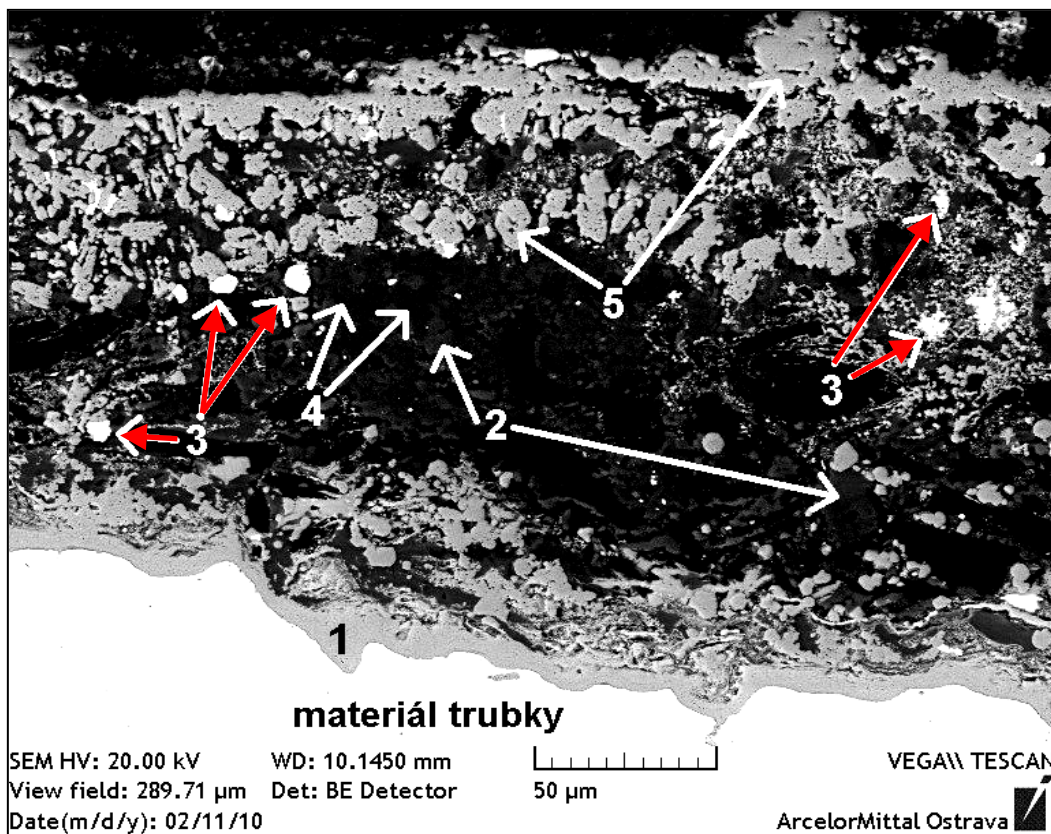
Obr. 3.10: Cu na vnitřním povrchu i v trhlinách, zvětšeno 144x.



Obr. 3.11: Detail obr. 3.10 Cu v trhlinách, zvětšeno 360x.

Cu byla zachycena i na dalších snímcích v prostoru trhlín, kde zřejmě difundovala při procesu svařování, jak zobrazují obrázky č. 3.10 a č. 3.11.

Snímek vzorku obr. č. 3.12 zachycuje vnitřní nános trubky, odebráno mimo svar. Pomocí spektrometru a rozboru nánosu byla prokázána přítomnost jednotlivých chemických prvků znázorněných v tabulce č. 3. 12.



Obr. 3.12: Snímek nánosu spektrometrem.

Na obrázku jsou znázorněny jednotlivé nánosy a rozděleny do složek dle příslušného barevného spektra. Spektrum č. 3. (bílá fáze) znázorňuje přítomnost kovové mědi v 96,59 [%]. Tato přítomnost mědi ve nitřním povrchu trubky parovodu je nadměrná a ve srovnání s jinými prvky nemá opodstatněný výskyt.

Na každém pozorovaném vzorku byla nalezená měď, a to převážně v místech převýšení kořenového svaru, kde působilo turbulentní, nelaminární proudění kapaliny. Měď se vyskytovala i mimo svary, ve volných prostorech parovodu. V těchto místech však nebyly zaznamenány žádné anomálie.

3.1.5 Porucha „B“ - perforace stěny trubky parovodu v oblasti SS.

Ve spalovací komoře docházelo vlivem vnitřního tlaku média k perforaci stěn potrubí. K těmto poruchám došlo převážně v oblasti spalovacích hořáků, a to po celém vnitřním obvodu komory v dané výšce. Ve všech případech docházelo k protržení nebo k oslabení stěn jen ze strany spalovací komory a vždy z vnitřní strany trubky. Úbytek materiálu se objevoval vždy v oblastech svarových spojů. Po odstavení kotle, jeho tlakového celku a vystavení bezpečnostních opatření pro vstup do spalovacího prostoru kotle se vizuálně lokalizovala poškozená místa. Pomocí ultrazvuku se proměřily další oblasti svarů trubek ve spalovací komoře. Tyto kontroly prokázaly u několika dalších trubek oslabení stěny trubky, a to o dva až tři mm. viz obr. č. 3.13. Poškozené části trubek byly vyjmuty a odeslány k laboratorní analýze. Povrch šetřených vzorků byl leptán 4% HNO₃.

U šetření vzorků poruchy „B“ došlo k perforacím stěny trubky s diagnostikovanými oslabeními stěny, způsobenými nadměrnou vnitřní korozí. Metalografický rozbor vzorků ukázal napadení korozí, a to výlučně v okolí svarů na trubkách. K účinkům koroze docházelo jen na stěně trubky ze strany spalovací komory. Koroze se projevovala lokálními a nerovnoměrnými plochami především v oblasti TOO svarového kovu, a to vždy s úbytkem materiálu. Na straně izolace nebyla koroze stěn zaznamenána.

3.1.6 Rozbor jednotlivých snímků.

Tato koroze zapříčinila radikální oslabení stěny trubky, a díky působení vnitřního tlaku média docházelo k vzniku trhlin a úniku vody do prostoru spalovací komory. Viz obr. č. 3.13.

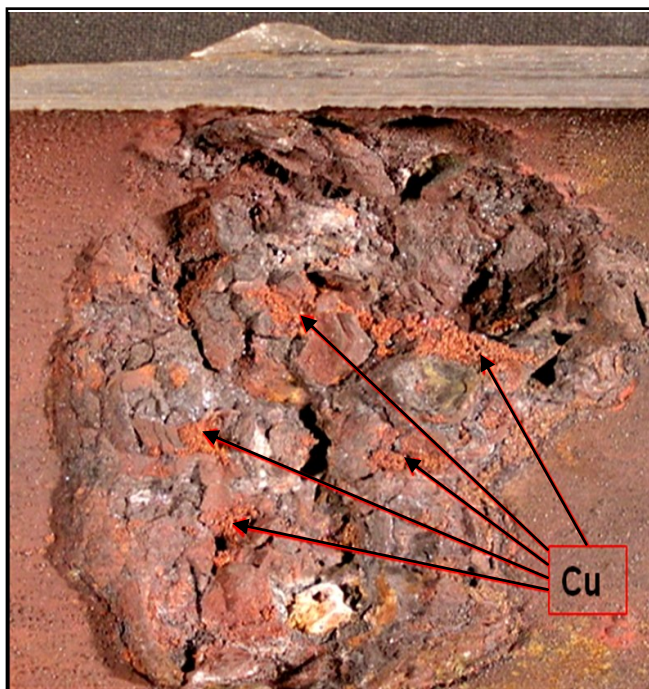


Obr. 3.13: Vzhled více napadeného vzorku ze strany spalovací komory.

Koroze je přítomna převážně na místech tepelně ovlivněných oblastí svarových spojů. Samotné svarové, kořenové housenky jsou v místech koroze takřka celistvé. Korozní účinky se tedy indikují převážně v TOO svarových spojích, přičemž samotný svarový kov vykazuje menší známky napadení korozí.



Obr. 3.14: Makro snímek, vzhledu korozního útvaru.



Obr. 3.15: Snímek prokazující nános Cu v korozním útvaru.

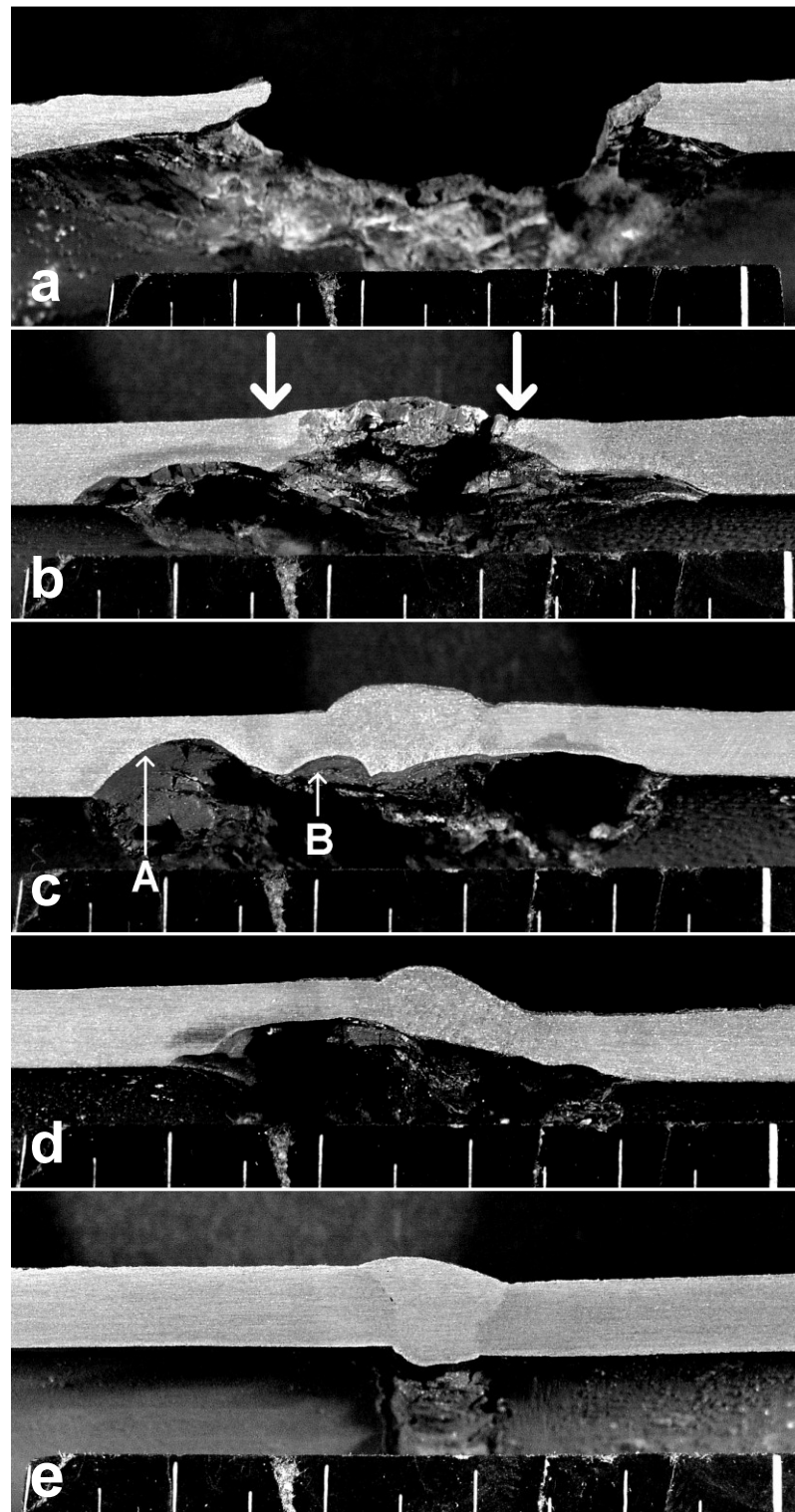
Snímek na obrázku č. 3.16 znázorňuje detail obr. č. 3. 15, povrch trubky v místě koroze, kde byla přítomna kovová měď, ve větších seskupeních.



Obr. 3.16: Detail snímku č. 3.15. Zvětšeno 35x .

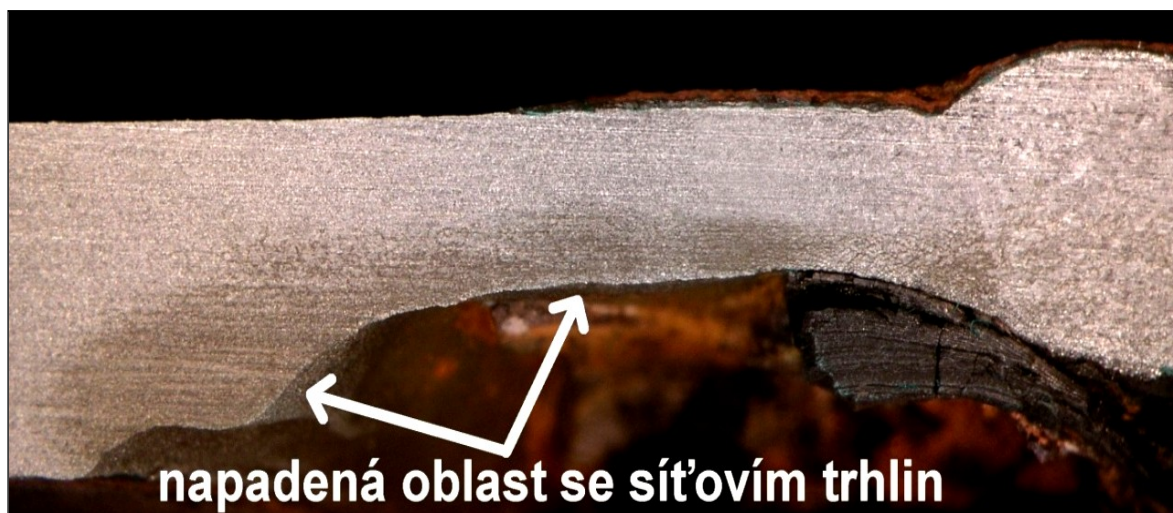
U podélných makrosnímků obrázků: 3.17 a), b), c), d), e) je patrná rozsáhlá koroze, velikost otvoru a celková korozní deformace stěny trubky. U snímku b), c) a d) je vidět korozní účinek v TOO svaru. Ze snímků lze konstatovat, že napadení v okolí svaru,

je rozsáhlejší (v TOO). Zatímco samotný svarový kov je méně napaden. Tím je i menší rozsah oslabení stěny trubky. Snímek e) prokazuje, že na stěně od izolace vlivem menších teplot nedocházelo k tak radikálním korozním účinkům.



Obr. 3.17: a), b), c), d), e) Podélné makro snímky znázorňující rozsah koroze.

Také je zde zachyceno rozsáhlé napadení trhlín po hranicích zrn. Jde o mezikrystalické trhliny, případně síťové trhliny. Viz obr. č. 3. 18. Tyto trhliny se vyskytují až do poloviny zbývající tloušťky stěny. V těchto trhlínách a jejich okolí bylo nalezeno zvýšené procento Cu.



Obr. 3.18: Vzorek ze strany spalovací komory znázorňující síťové trhliny.

3.1.7 Analýza poruch „A“ a „B“.

Teplota na vnitřních stranách potrubí a relativně malá rychlost turbulentního proudění média může mít za důsledek přilnavosti měděných zrnků na stěny potrubí ze strany spalovací komory, kde teplota vykazuje vyšších hodnot. Na těchto místech se Cu usazovala a mohla se podílet na vzniklých poruchách při technologii svařování i na vzniku koroze.

Porucha „A“:

Na základě těchto skutečností lze říci, že nejpravděpodobnější příčinou praskání trubky při svařování je přítomnost mědi v povlaku na vnitřním povrchu trubky. Měď zřejmě při procesu svařování difundovala z povlaku do materiálu trubky, čímž oslabila kohezní pevnost a způsobila zkřehnutí materiálu.

Porucha „B“:

Primární příčinou poruchy může být znehodnocení SS mědí, která již při svařování byla v soustavě parovodu prokazatelně přítomna. Nedostatečné opracování svarových ploch mohlo zapříčinit kontaminaci SS a způsobit tak prvotní problém vzniku síťových trhlín. Tyto trhliny mají za následek vzniku působení prostupující koroze. Tento proces

nazýváme „vodíková nemoc mědi“. V tomto procesu koroze mohou hrát roly i další aspekty uvedené v následující kapitole.

3.1.8 Charakter a možné příčiny vzniku poruch.

Ze všech výsledků protokolů šetřených vzorků vyplývá přítomnost Cu. Celkem byla kovová měď detekována u čtyř kotlů šetřených na přítomnost Cu. Lze tedy s určitostí konstatovat, že kovové částice Cu jsou přítomny u více tlakových celků kotelny i ve varnicích a parovodních trubkách. Poruchy varnic vlivem koroze a následné perforace stěny trubek byla detekována u tří kotlů a jejich spalovacích komor, a to ve větším rozsahu. Tyto poruchy, způsobené vlivem koroze, a technologii svařováním, se projevovaly vždy v oblasti SS.

Krystalová struktura mědi je tvořená kubickou mřížkou plošně centrovanou (FCC) stejně jako Fe γ (austenit). V této homogenní struktuře oceli Fe γ s obsahem uhlíku 1,7 % dochází k tuhnutí v rozmezí teplot 1230 až 1030°C, kdy zůstává Cu v tekutém stavu do teploty 1084°C. U této oceli dochází s poklesem teploty k vzniku tuhého roztoku na bázi feritu a cementitu. Probíhá změna krystalografické mřížky z Fe γ (BCC) na Fe α (FCC). V této struktuře je Fe α i Cu v tuhém stavu, mají ale rozdílnou mřížku. Zatím co u železa došlo k polymorfní přeměně mřížky, Cu je neměnná. Tímto dochází k vnitřnímu napětí a deformaci, SS kdy Cu v podobě vměstku s jinou krystalografickou mřížkou způsobuje vznik trhlin.

Prokazatelná přítomnost Cu v soustavě parovodů a varnic může mimo jiné vést k vzniku koroze způsobenou galvanickým článkem Fe – Cu. Tato koroze vlivem Cu může mít několik charakterů, naplňující důsledek vzniku znehodnocení SS. Jednak Cu způsobuje několikanásobně zvýšení rychlosti prostupu koroze do hloubky materiálu. A to především za pomoci dalších iniciátorů přítomných v soustavě parovodu, jako je teplota, vodík, kyslík, tlak, zvýšená zásaditost nebo kyselost media (Ph).

Také přítomnost kyslíku v daném prostředí vede k urychlení korozního procesu v podmínkách provozu parovodu a k tvorbě oxidu železa. Kyslík se uvolňuje i prostřednictvím mědi. Při svařování dochází k difuzi vodíku do mědi a oxid měďnatý Cu₂O se rozkládá na Cu a vodní páru, která je v mikroskopických dutinách uzavřena pod velkým tlakem. Důsledkem tohoto působení tlaku vznikají síťové trhliny. Tento proces nazýváme vodíkovou nemocí mědi. Rychlost prostupu koroze ve SS zvětšuje přítomnost vodíku, kyslíku, tlaku, teploty a zásaditost nebo kyselost media (Ph) v parovodu, kde působí ve vzniklých síťových trhlínách v neustálém opakujícím se procesu. Tento opakující se

proces vede ke kritickému oslabení stěny trubky. Působením vnitřního tlaku média dochází k perforaci stěny trubky a úniku média do prostor spalovací komory kotle.

Všechny tyto aspekty by mohly být příčinou znehodnocení svarového spoje, a to především v důsledku superpozice jednotlivých činitelů koroze. To znamená, že prokázaná přítomnost mědi v teplárenské části energetiky a při technologii svařování daného parovodu mohla být důsledkem vzniklých degradací SS.

Možné iniciátory vzniklé koroze.

Nejpravděpodobnější iniciátory vzniku koroze, které mohou v daném prostředí, celého cyklu prodělení média nastat jsou:

- vodíková koroze. $H_2 + C$ vznik metanu,
- vodíková nemoc. Působení koroze v místech TOO svarového spoje, prostředí mědi, kyslíku, vodíku,
- makročlánek. Rozdíl v ušlechtilosti dvou materiálu. Cu / Uhlíková ocel,
- sezónní praskání. Amoniak – mosaz,
- selektivní Koroze - Odzinkování mosazi. Uvolňování Cu z mosazi.

Návrhy k preventivnímu opatření:

- dostatečné demineralizování vody přivedené do soustavy,
- úprava vody, jejího chemického složení, a PH dodávané do soustavy,
- kontroly celkového cyklu vody s dalšími průvodními příměsemi a úpravami vody,
- teplotní změny média v průběhu celého cyklu,
- výčet všech materiálových prostředí, kterými médium prochází,
- čištění, proplachy soustavy potrubí,
- dostatečné odluhování a odkalování, jejich četnost, monitoring, analýza,
- analýza všech uskutečněných protokolů, výzkumů a chemických rozborů.

Je zapotřebí se zabývat všemi možnými příčinami, které mohou mít naplňující podstatu dané koroze. Vysoce pravděpodobná je kombinace některých na sebe navazujících jmenovaných jevů, které se podílejí přímo, nebo podmíněně na vzniklé korozi. [9]

3.1.9 Alternativní řešení náhrady měděné pasty

Pro eliminaci co největšího procenta výskytu Cu v potrubním systému energetiky navrhuji nahrazení tohoto druhu maziva.

Mazací pasta CU 800 firmy WÜRTH aplikovaná na povrch dělicích rovin armatur, přírub a vnitřních ucpávek samotěsů vysokotlakých armatur, je na bázi měděných zrn smíchaných anorganickým pojivem. Doporučuji toto mazivo nahradit mazivem LOCTITE 8009. Toto mazivo je produktem na bázi grafitu a fluoridu vápenatého, který neobsahuje žádné kovové příměsi. Použití tohoto mazadla je v rozmezí pracovních teplot od -29 °C do +1315 °C.

3.2 Návrh technologického postupu opravy varnice po kontaminaci Cu.

Pro opravu varnice kontaminované mědí jsem sestavil specifický technologický postup svařování s ohledem na mnou navrženou úpravu svarových ploch. Nechal jsem svařit část původní kontaminované varnice s novou trubkou, která bude používána k opravě kotle. Simuloval jsem tak podmínky SS, které budou aplikovány v praxi. Podrobil jsem svarový spoj předepsanými NDT a DT zkouškami dle ČSN EN ISO 156 14 – 1. Vyhodnotil jsem tyto výsledky zkoušek a sestavil celkový technologický postup opravy parovodu.

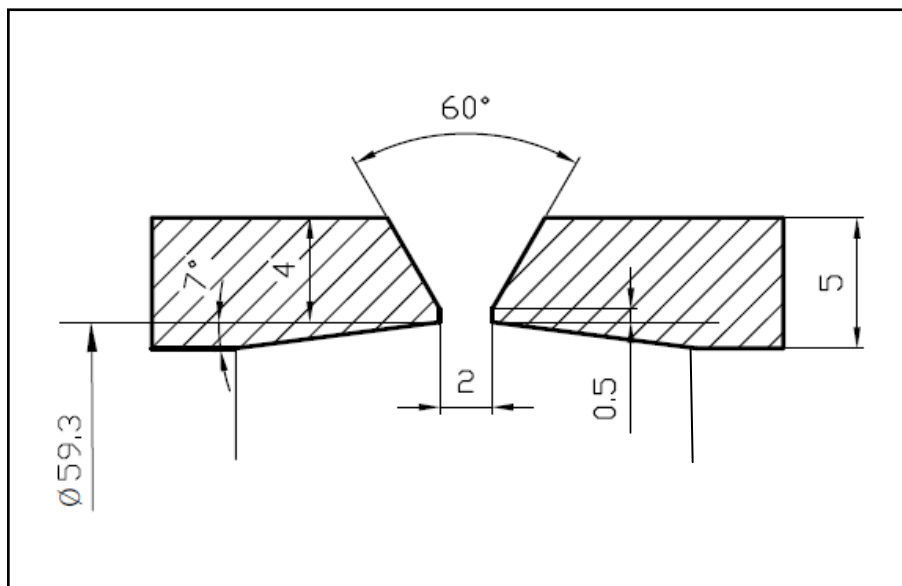
3.2.1 Návrh odstranění mědi z povrchu trubek před opravou svařováním.

Z vnitřního povrchu potrubí je důležité odstranit kovovou měď, aby nedocházelo k znehodnocení svarového spoje.

Třískovým obráběním, pomocí stopkové frézy, jsem nechal obrobit vnitřní povrch trubek, a to s úběrem 1mm do vzdálenosti 25mm od plochy řezu. Aby spojením dvou svařovacích ploch nedošlo k vzniku nežádoucího technologického vrubu, navrhl jsem tyto vnitřní plochy upravit u obou svařovaných kusů trubek. Jak vnitřní plochu varnice, tak vnitřní plochu nové trubky dle obr. 3. 19.

3.2.2 Úprava svarových ploch

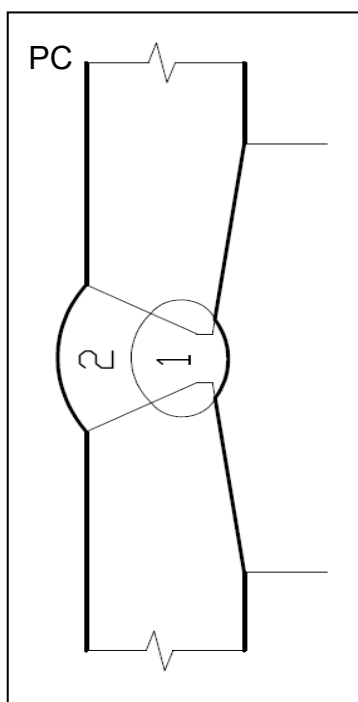
Při úpravě svarových ploch jsem vycházel z příslušných norem ČSN EN ISO 9692-1 a ČSN 131075 s ohledem na metodu svařování 141 TIG. Podle těchto norem jsem navrhl úpravu svarových ploch viz obr. č. 3.19. Plochy svarových spojů byly upraveny třískovým obráběním, a to za pomoci ukosovací frézy dle rozměrů nákresu. Vnější průměry konce upravených ploch se po obvodu opracovaly stopkovou frézou ve vzdálenosti 25mm od plochy čela trubky. Pro navržený rozsah všech NDT a DT zkoušek jsem nechal zhotovit dva zkušební vzorky svarů.



Obr. 3.19: Tvar svarového spoje

3.2.3 Způsob kladení svařovacích vrstev.

Způsob kladení svařovacích vrstev byl realizován v poloze PC, tzn. v horizontální poloze na dvě svařovací vrstvy, tedy kořenovou a krycí vrstvu, bez pootočení viz. obrázek č. 3.20. Jednotlivé vzorky se nastehovaly v délce 6 mm, ve třech bodech pootočením o úhel 120°. Svarové vrstvy 1 a 2 byly svařeny podle parametrů uvedených v tabulce č. 8. Dle kvalifikovaného technologického postupu svařování viz příloha A. Specifikace postupu svařování (WPS).



Obr. 3.20: Náskres způsobu kladení svařovacích vrstev.

3.2.4 Vlastnosti základního materiálu

Jakost 12022.1 - (1.1142). Rozměr Ø 60,3 x 5 mm.

Materiálový inspekční certifikát trubky je uveden v příloze J.

Tabulka č.7 Vlastnosti základního materiálu

Chemické složení:							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0.19	0.51	0.21	0.05	0.04	0.18	0.010	0.011
Mechanické vlastnosti:							
Číslo tavby 1952	Mez kluzu ReH [MPa]		Mez pevnosti Rm [MPa]				
předpis	min. 255		440-570				
Výsledky zkoušek	410		504				
	418		519				
	394		492				
	418		525				

3.2.5 Vlastnosti přídavného materiálu.

Přídavný materiál je v souladu s příslušným protokolem WPS č. 4/49/ 01/12, viz příloha A. Certifikační listiny k přídavným materiálům jsou uvedeny v příloze K a L. Přídavný materiál je drát GI 113 průměr 2 a 2.5 mm, dle katalogu firmy ESAB Vamberk.

Tabulka č.8 Vlastnosti přídavného materiálu Ø 2 mm

Chemické složení:									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
0.080	1.100	0.600	0.017	0.011	0.050	0.020	0.010	0.030	0.001
Mechanické vlastnosti:									
	Mez kluzu ReH [MPa]				Mez pevnosti Rm [MPa]				
Výsledky zkoušek	430				500				

Tabulka č.9 Vlastnosti přídatného materiálu Ø 2,5 mm

Chemické složení:						
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.080	1.100	0.600	0.015	0.010	0.040	0.020
Mechanické vlastnosti:						
	Mez kluzu ReH [MPa]		Mez pevnosti Rm [MPa]			
	Výsledky zkoušek		430		500	

3.2.6 Kvalifikace svářeče

Dle normy ČSN EN 287-1 uvedené v tabulce č. 10 musí svářeč složit příslušné zkoušky za účelem získání odborné způsobilosti (certifikátu) pro svařování zařízení podléhající různě náročným technickým požadavkům. Svářeč skládá zkoušku na plechách, trubkách, tyčích, a to v rámci dané skupiny nebo podskupiny metody svařování, druhu základního materiálu, přídatného materiálu, polohy svařování a rozměrů zkušebního vzorku.

Tabulka č.10 Kvalifikace svářeče.

ČSN EN 287 – 1 141 T BW 1.3 S t5,0 D60,3 PC ss nb	
Vysvětlení:	
ČSN EN287 – 1	Evropská norma pro kvalifikaci svářeče
141	Metoda svařování – TIG Obloukové svař. wolframovou elektrodou v inertním plynu.
T	Trubka
BW	Tupý svar
1.3	Skupina materiálů dle TNI CEN ISO – TR 15608 Skupina mat. 1.3 – Normalizačně žíhané oceli s minimální mezí kluzu $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
S	Přídavný materiál - plný drát / tyčinka
t5,0	Tloušťka trubky [mm]
D 60,3	Průměr trubky [mm]
PC	Poloha svařování - Tupý svar na trubce, osa svislá
ss	Zhotovení svaru (jednostranný)
nb	Zhotovení svaru (kořenová vrstva bez podložky)

3.2.7 Parametry svařování zkušebních vzorků.

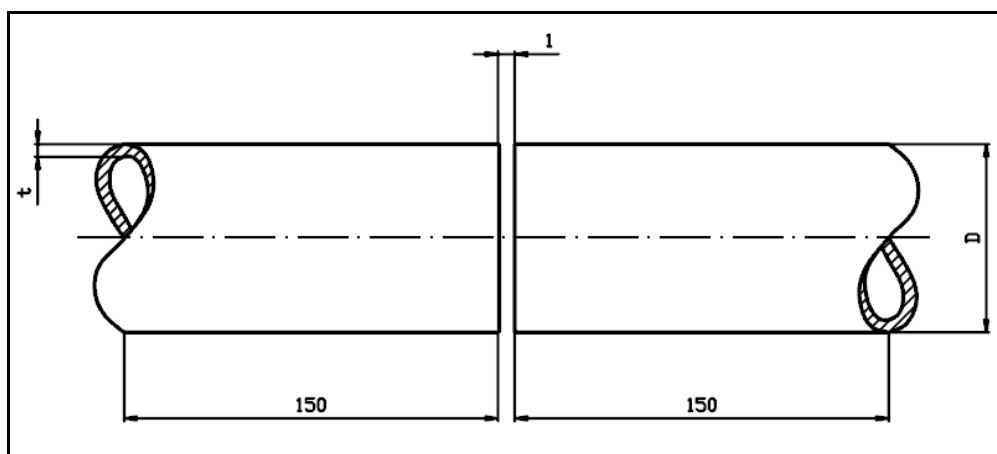
Svar zhotoven obloukovým svařováním metodou 141 TIG na dvě vrstvy. Při svařování nesmí být trubky zatíženy žádnou vnější silou. Svarové vrstvy 1 a 2 se zavaří dle parametrů uvedených v tabulce č. 11.

Tabulka č.11 Parametry svařování.

Svarová housenka	1	2
Metoda svařování	141	141
Průměr přídavného materiálu (mm)	2	2,5
Svařovací proud (A)	89	96
Svařovací napětí (V)	14	16
Druh proudu/polarita	= (-)	= (-)
Ochranný plyn/průtok	Ar- I1 / 8-14 l/min	
Wolframové elektrody, druh/průměr	WT20 / 2,4mm	

3.2.8 Vyhodnocení NDT a DT zkoušek svařovaných vzorků.

Příprava, rozměr a označení vzorků dle ČSN EN ISO 15614-1. viz obr. 3.21.



Obr. 3.21: Náčrtes zkušebního vzorku dle ČSN EN ISO 15614 - 1.

1 – příprava spoje ke svařování

D – vnější průměr trubky

t – tloušťka materiálu

Nedestruktivní zkoušky

Vizuální kontrola.

Vizuální kontrola svarových spojů před, během a po svařování dle ČSN EN ISO 17 637. Určení stupně kvality svarového spoje zkušebních vzorků dle ČSN EN ISO 5817.

Kritéria hodnocení: trhliny, póry, zápaly, povrchové bubliny, nadměrné převýšení svaru, nadměrná strmost, přeteklý povrch svaru, lineární přesazení, úhlové přesazení, prohloubený povrch svaru, nepravidelná šířka a povrch svaru, chybné napojení atd.

Výsledek vizuální kontroly vyhovuje nejvyššímu stupni jakosti B, dle ČSN EN ISO 5817 viz protokol č. 2/01/12 příloha B.

Zkouška prozářením.

Rozsah zkoušení 100%. Vyhodnocení zkoušky dle ČSN EN 1435 (B), ČSN EN 444 a vyhodnocení dle ČSN EN 12517-1, stupeň přípustnosti 1.

Z výsledků vyplývá, že svary vyhovují tomuto stupni a nebyly detekovány žádné nepřípustné indikace. Viz protokol č. 004/2012 příloha C.

Zkouška magnetická prášková.

Zkoušení a vyhodnocení vzorků s požadovaným stupněm přípustnosti 1 dle ČSN EN ISO 23 278.

Dle výsledků zkoušky nebyly zjištěny žádné nepřípustné indikace. Zkouška je vyhovující v souladu se stupněm jakosti 1. viz protokol č. 002/2012 v příloha D.

Destruktivní zkoušky

Příčná zkouška tahem svarového spoje.

Zkoušení a vyhodnocení zkušebních vzorků dle ČSN EN ISO 6892-1. Výsledky zkoušky tahem vzorků splňují pevnost tahu základního materiálu. Naměřené hodnoty jsou vyšší než minimální předepsaná pevnost v tahu.

Zkouška je vyhovující, viz protokol č. P 42/12 příloha E.

Zkouška lámavosti ohybem.

Zkoušení a vyhodnocení vzorků dle ČSN EN ISO 5173.

Vzorky byly podrobeny zkoušce lámavosti ohybem z vnější strany, na kontrolu povrchové vrstvy svaru a z vnitřní strany na kontrolu kořenové vrstvy svaru. Úhel ohybu 180°, průměr trnu – D=20mm. Viz protokol č. P 42/12 příloha F.

Z výsledků zkoušení se na vzorcích neobjevily žádné vady. Zkouška je vyhovující.

Zkouška rázem v ohybu.

Zkoušení vzorků dle ČSN ISO 148 – 1 a vyhodnocení dle ČSN EN 13480 – 2.

Dle ČSN EN 13480 – 2/A2 příloha B - tabulka 3.1 je kladeno kritérium pro rozměry vzorků menších než 10mm. Pro rozměr vzorku 10x5 mm, je minimální nárazová práce 14 J. Dle výsledku zkoušky vrubové houževnatosti a výpočtu nárazové práce, splňují zkušební tyče minimální kritérium KV 14 J při rozměru vzorku 10x2,5 mm.

Tabulka č.12 Výsledky zkoušky rázem v ohybu.

Číslo vzorku	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Průřez [cm ²]	KV [J]	KCV [J/cm ²]	T [°C]
1	8,0	2,5	0,20	25	125	20
2	8,0	2,5	0,20	26	130	20
3	8,0	2,5	0,20	26	130	20

Výsledky hodnoty vrubové houževnatosti KCV [J/cm²], jsou nad minimální přípustnou hodnotou 59 J/cm² pro danou jakost oceli 12022 uvedenou v materiálovém listě.

Zkouška splňuje dané kriteria pro nárazovou práci a vrubovou houževnatost. Protokol č. P 42/12 příloha G.

Zkouška tvrdosti HV10.

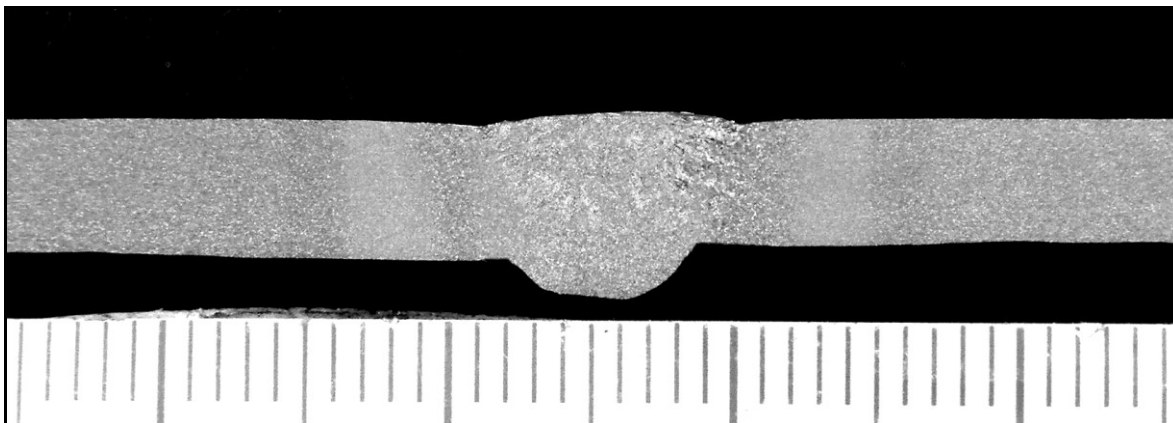
Zkoušení a vyhodnocení vzorků dle ČSN EN ISO 6507 – 1.

U zkoušky nebyla překročena nejvyšší hodnota tvrdosti dle základního materiálu podle Vickerse HV10 = 380. Zkouška je vyhovující viz protokol č. P 42/12 příloha H.

Zkouška makrostruktury a mikrostruktury.

Zkoušení a vyhodnocení dle ČSN EN 1321.

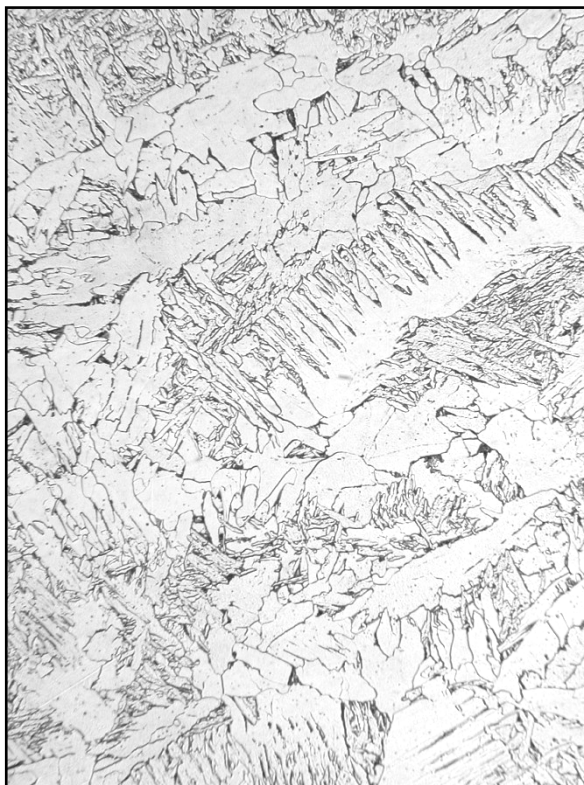
Vzorek odebraný v příčném řezu svaru. Makro snímek svarového spoje viz obr. č. 3. 22. zobrazuje detail celého svarového spoje včetně jeho části TOO. Na snímku lze rozpoznat jednotlivá pásma a jejich strukturu charakteristickou pro SS. Makroskopická zkouška nám zhodnotila celistvost celého svarového spoje. Na snímku nejsou indikovány žádné charakteristické znaky vad. Zkouška makrostruktury vyhověla dle ČSN EN 1321. viz protokol č. P024/032 příloha CH.



Obr. 3.22: Snímek makrostruktury svaru.

Zkouška mikrostruktury šetřena z pořízených snímků kolmo na osu svaru. Snímky zachycují strukturu svarového spoje a jeho jednotlivé tepelně ovlivněné oblasti (TOO/HAZ) viz. obrázky č. 3.23. až 3.27.

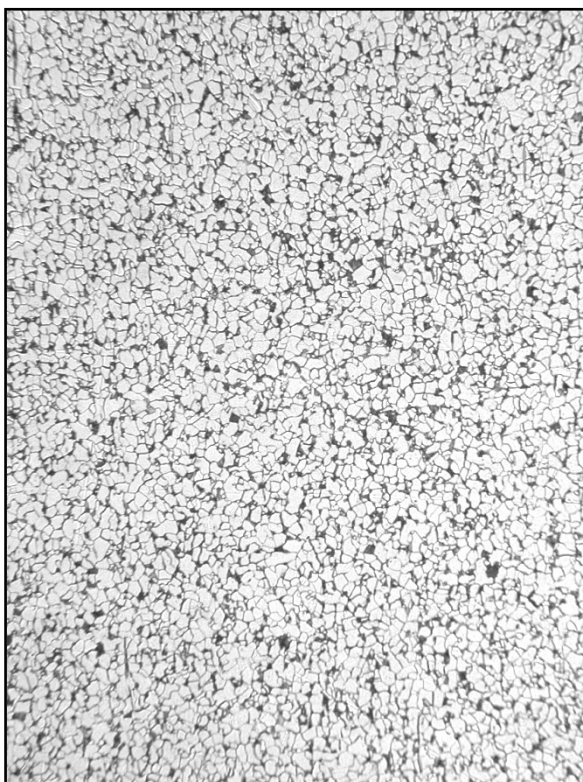
Mikrostruktura svarového kovu, přehřáté oblasti, normalizační oblasti, částečné překrystalizace a neovlivněné oblasti základního materiálu, nevykazují žádné charakteristické znaky vad uvedené v ČSN EN 1321. Jednotlivé strukturní fáze SS dle snímků prokazují poměr přeměny fází (austenitu, feritu, perlitu, bainitu). Velikost zrn, a zhrubnutí pásem TOO i svarového kovu je vyhovující. Mikroskopická kontrola oblastí svarového spoje je vyhovující dle ČSN EN 1321, protokol č. P024/032 příloha I.



Obr. 3.23: Snímek mikrostruktury svarového kovu.



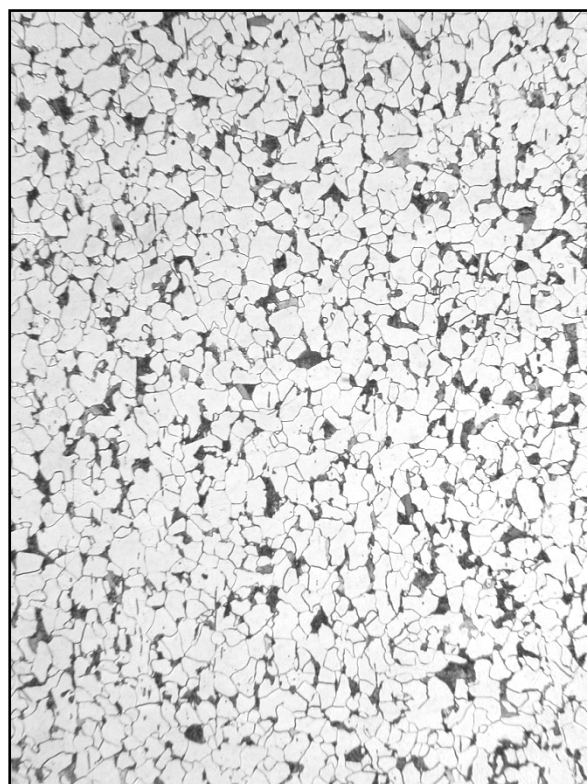
Obr. 3.24: Snímek mikrostruktury svaru tepelně ovlivněné oblasti na straně svaru.



Obr. 3.25: Snímek mikrostruktury TOO zóna normalizace.



Obr. 3.26: Snímek mikrostruktury TOO oblasti na straně základního materiálu.



Obr. 3.27: Snímek mikrostruktury základního materiálu.

3.3 Návrh technologického postup opravy varnic.

Pro bezpečný vstup do prostoru spalovací komory kotle je nezbytné převzít od provozovatele kotle bezpečnostní a požární příkaz k výkonu svářečských prací na zařízení. Poté je nutné diagnostikovat a lokalizovat danou závadu. Pomocí lešení a plošin zpřístupnit místo závady.

Úhlovou bruskou vyřízneme poškozenou část potrubí o délce $l = 250$ mm. Oba konce varnice se třískovým obráběním (ukosovací frézou) upraví do stanoveného tvaru SS (viz WPS č. 4/49/ 01/12, příloha A). Pomocí stopkové frézy se opracuje vnitřní a vnější část potrubí na obou koncích. Vnitřní plocha SS se opracuje do hloubky 1 mm při dodržení stanoveného úhlu pro zamezení vzniku technologického vrubu. Upraví se tak i konce nové části trubky. Nová část trubky se pomocí vodících svěrek vystředí s trubicí parovodu. Nastehují se třemi stehy v délce 6 mm a vzájemném pootočení o 120° . Postup technologie svařování a parametrů dle WPS viz příloha A. Kvalifikace svářeče pro zhotovení daného svaru ČSN EN 287-1 141 T BW 1.3 S t5,0 D60,3 PC ss nb. Po svaření se oba svary povrchově očistí ocelovým kartáčem. Provede se vizuální kontrola svarů dle ČSN EN ISO 17 637, vyhodnocení vad podle ČSN EN ISO 5817. Pro důkladnější ověření povrchových vad se provede magnetová prášková zkouška dle ČSN EN ISO 17 638 a vyhodnocení dle ČSN EN ISO 23 278 stupeň přípustnosti 1. Dále provedeme zkoušku prozářením snímkováním ze dvou stran u obou svarů, dle ČSN EN 1435 (B), ČSN EN 444 a vyhodnocení dle ČSN EN 12517-1, stupeň přípustnosti 1. Jsou- li zkoušky pozitivní, uzavře se bezpečnostní a požární příkaz. Tlakovou zkouškou za přítomnosti akreditovaného revizního technika se ověří těsnost svarových spojů v celém rozsahu parní komory. Zkušební tlak a teplota dle interních předpisů pro dané zařízení. Jsou- li zjištěny netěsnosti, odstraní se pomocí tohoto technologického postupu. Je-li tlaková zkouška pozitivní, tato vada je tímto odstraněna a může dojít k najetí kotle a zapojení do provozu.

Dle ČSN EN ISO 3834 – 2 je průběh celé opravy dokumentován ve svářečském deníku se všemi náležitostmi o provedené opravě. Deník obsahuje charakter poruchy, umístění svarů, výsledky určených zkoušek, certifikační listiny přídatných materiálů, atesty základního materiálu, postup svařování při opravě, jméno odpovědného technologa, jméno svářeče a certifikát svářeče. Tento dokument o provedené opravě (svářečský deník) je archivován.

4 Závěr

V této diplomové práci jsem zpracoval studii svařování konkrétní uhlíkové oceli jakosti 12 022.1 používané v energetických zařízeních. V druhé části této práce jsem se zabýval původem kontaminace parovodu o jakosti materiálu 12022.1 mědí a dále možnými příčinami vzniku koroze. Provedl jsem rozbor jednotlivých laboratorních výsledků a snímků. Učinil analýzu a uvedl příčinu praskání svarových spojů při opravě parovodu. Na základě výsledků zkoušek svařených vzorků trubek, které simulovaly svařovaný spoj varnice, jsem navrhl technologický postup opravy parovodu s ohledem na kontaminaci vnitřního povrchu mědí. Technologický postup je stanoven pro opravu potrubí jakosti oceli 12022.1, na dopravu syté páry v energetice.

Seznam tabulek:

	strana
Tabulka č.1 Rozdělení oceli třídy 12022 dle TNI CEN ISO – TR 15608.	- 10 -
Tabulka č.2 Značení oceli třídy 12 022 a její alternativy.	- 11 -
Tabulka č.3 Chemické složení pro oceli 12 022 dle ČSN 412022.	- 11 -
Tabulka č.4 Přehled tloušťek uhlíkových ekvivalentů podle IIW	- 13 -
Tabulka č.5 Maximální kombinované tloušťky bez předehřevu	- 20 -
Tabulka č.6 Stupně obsahu vodíku	- 21 -
Tabulka č.7 Vlastnosti základního materiálu	- 42 -
Tabulka č.8 Vlastnosti přídatného materiálu Ø 2 mm	- 42 -
Tabulka č.9 Vlastnosti přídatného materiálu Ø 2,5 mm	- 43 -
Tabulka č.10 Kvalifikace svářeče.	- 43 -
Tabulka č.11 Parametry svařování.	- 44 -
Tabulka č.12 Výsledky zkoušky rázem v ohybu.	- 46 -

Seznam obrázků:

	strana
Obr. 2.1: Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO.	12 -
Obr. 2.2: Teplotní závislost rozpustnosti vodíku v železe.....	15 -
Obr. 2.3: Rovnovážný diagram Fe-FeO v oblasti teplot tavení.....	17 -
Obr. 2.4: Stanovení kombinované tloušťky stěny BW svarového spoje.	22 -
Obr. 2.5: ARA diagram oceli jakosti 12 022. [10]	23 -
Obr. 3.1: vnitřní povrch trubky se svarem a trhlinami v jeho blízkosti. zvětšeno 2x.....	27 -
Obr. 3.2: Detail trhliny k obr. č. 2. zvětšeno 4x.	27 -
Obr. 3.3: Snímek menších trhlin u svaru z jedné strany, zvětšeno 10x.....	28 -
Obr. 3.4: Snímek vzhledu trhliny u svaru, zvětšeno 14x.	28 -
Obr. 3.5: Detail trhliny zvětšeno 72x.....	29 -
Obr. 3.6: Cu, světle červené útvary, zvětšeno 144x.....	29 -
Obr. 3.7: Cu blíže k povrchu trubky, zvětšeno 144x.....	30 -
Obr. 3.8: Vzhled dalších (menších) trhlin u svaru, zvětšeno 144x.....	30 -
Obr. 3.9: Detail obr. 3.8 Cu v trhlínách, zvětšeno 360x.....	31 -
Obr. 3.10: Cu na vnitřním povrchu i v trhlínách, zvětšeno 144x.	31 -
Obr. 3.11: Detail obr. 3.10 Cu v trhlínách, zvětšeno 360x.....	32 -
Obr. 3.12: Snímek nánosu spektrometrem.	32 -
Obr. 3.13: Vzhled více napadeného vzorku ze strany spalovací komory.	34 -
Obr. 3.14: Makro snímek, vzhledu korozního útvaru.....	34 -
Obr. 3.15: Snímek prokazující nános Cu v korozním útvaru.	35 -
Obr. 3.16: Detail snímku č. 3.15. Zvětšeno 35x	35 -
Obr. 3.17: a), b), c), d), e) Podélné makro snímky znázorňující rozsah koroze.....	36 -
Obr. 3.18: Vzorek ze strany spalovací komory znázorňující síťové trhliny.	37 -
Obr. 3.19: Tvar svarového spoje	41 -
Obr. 3.20: Nákras způsobu kladení svařovacích vrstev.	41 -
Obr. 3.21: Nákras zkušební vzorku dle ČSN EN ISO 15614 - 1.....	44 -
Obr. 3.22: Snímek makrostruktury svaru.	47 -
Obr. 3.23: Snímek mikrostruktury svarového kovu.	47 -
Obr. 3.24: Snímek mikrostruktury svaru tepelně ovlivněné oblasti na straně svaru.....	48 -
Obr. 3.25: Snímek mikrostruktury TOO zóna normalizace.....	48 -
Obr. 3.26: Snímek mikrostruktury TOO oblasti na straně základního materiálu.....	49 -
Obr. 3.27: Snímek mikrostruktury základního materiálu.	49 -

Použitá literatura

- [1] KOUKAL J., SCHWARZ D., HAJDÍK J. *Materiály a jejich svařitelnost*, Ostrava 2009. Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ: *Materiály a jejich svařitelnost*, Ostrava 2001, Zeross, 292 s.
- [3] ČSN 05 0211 - *Tepelné Mechanické spracovanie zvarových spojov nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Všeobecné zásady*. 9.1992.
- [4] ČSN EN 1011-1. Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování.
- [5] ČSN EN 1011-2. Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí. 8. 2004.
- [6] KOUKAL J., ZMYDLENÝ T. *Svařování 1*. Ostrava 2005 : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 136 s. ISBN 80-248-0870-6.
- [7] GRÖBNER P. *Koroze a ochrana materiálů. Koroze ocelí a litin v plynném prostředí za vysokých teplot*. Nakladatelství technické literatury Praha 1, 224 s. 1964.
- [8] MRŠÁL R. Bakalářská práce - *Návrh technologického postupu svařování parovodu*. VŠB-TU Ostrava 2010. 65 s.
- [9] VŠB – TU OSTRAVA. Fakulta strojní, Katedra inženýrské technologie. *Zápis konzultace s ing. doc. Podjuklová PhD*. 7. 6. 2011.
- [10] JECH J. *Tepelné zpracování oceli*. Metalografická příručka. Praha: SNTL, 1969.- 6
- [11] ČSN EN ISO 9015 – 2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2 : Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. 7. 2011.
- [12] ČSN EN ISO 15614 – 1. *Stanovení a kvalifikace postupu svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování - Část 1: obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. 5.2005.
- [13] ČSN EN 1291 *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů magnetickou metodou práškovou - Stupně přípustnosti*. 1. 2000.
- [14] ČSN EN 444. *Nedestruktivní zkoušení - Základní pravidla pro radiografické zkoušení kovových materiálů rentgenovým zářením a zářením gama*. 10.1996.
- [15] ČSN EN 13480-5. *Kovová průmyslová potrubí - Část 2: Materiály*. 6.2003.
- [16] ČSN EN ISO. 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. 8.2006.

- [17] ČSN EN 050211. *Tepelné a mechanické spracovanie zvarových spojov nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Všeobecné zásady.* 10.1992.
- [18] ČSN EN 1321. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů.* 7.1998.
- [19] ČSN EN ISO 5817 *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality.* 1.2008.
- [20] ČSN EN 1668. *Svařovací materiály - Tyče a dráty pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí wolframovou elektrodou v inertním plynu a jejich svarové kovy – Klasifikace.* 4.1999.

Seznam příloh

- Příloha A. Protokol č. 4/46/ 02/10. Specifikace postupu svařování (WPS).
- Příloha B. Protokol č. 2/01/12. Vizuální zkouška svarových spojů.
- Příloha C. Protokol č. 004/2012. Zkoušky prozářením, strana 1-2.
- Příloha D. Protokol č. 002/2012. Magnetická prášková zkouška.
- Příloha E. Protokol č. Příčná zkouška tahem.
- Příloha F. Protokol č. Zkouška lámavosti ohybem.
- Příloha G. Protokol č. Zkouška rázem v ohybu.
- Příloha H. Protokol č. Zkouška tvrdosti HV10.
- Příloha CH. Protokol č. Zkouška makrostruktury.
- Příloha I. Protokol č. Zkouška mikrostruktury.
- Příloha J. Protokol č. 28673/1/10. Inspekční certifikát trubky Ø 60,3 x 5mm, strana 1-2.
- Příloha K. Protokol č. 307020R150. Atest přídavného materiálu drátu Ø 2 mm.
- Příloha L. Protokol č. 307024R150. Atest přídavného materiálu drátu Ø 2.5 mm.